

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tesisenred.net](http://www.tesisenred.net)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

# Diseño de una nueva barrera continua de hormigón *in situ*

tesis doctoral realizada por:  
Jordi Cañas Gallart

dirigida por:  
Antonio Aguado de Cea  
Albert de la Fuente Antequera

Barcelona, febrero 2016

Universitat Politècnica de Catalunya  
Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

# TESIS DOCTORAL





Curso académico: 2015 - 2016

## Acta de calificación de tesis doctoral

Nombre y apellidos

JORDI CAÑAS GALLART

Programa de doctorado

ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ

Unidad estructural responsable del programa

ENGINYERIA CIVIL I AMBIENTAL

## Resolución del Tribunal

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de la su tesis doctoral titulada "DISEÑO DE UNA NUEVA BARRERA CONTINUA DE HORMIGÓN *IN SITU*"

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

NO APTO       APROBADO       NOTABLE       SOBRESALIENTE

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a		Secretario/a	
(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	
Vocal	Vocal	Vocal	

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Escuela de Doctorado, a instancia de la Comisión de Doctorado de la UPC, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

SÍ       NO

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado		Secretario de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado	

Barcelona a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer, Antonio Aguado y Albert de la Fuente por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de investigación, pero sobre todo, por su paciencia, apoyo y dedicación durante todo este tiempo. Gracias a la experiencia y la visión de Antonio; y la vertiente técnica y de rigor de Albert han sido fundamentales para el desarrollo de esta tesis. Una vez más mi más sincero agradecimiento.

En segundo lugar, quiero agradecer a las empresas GIVASA, IDIADA, EIFFAGE y FCC-Servià Cantó para darme la oportunidad de participar en un proyecto tan destacable e innovador como el BAHORIS. Soy consciente de que este tipo de proyectos no son usuales y gracias a ellos he podido ser partícipe en primera línea. En particular, doy mis agradecimientos a Ginés Antolino, Andrés Navarro y Daniel Antolino (GIVASA); a Eloi Boix, René Molina, Xavier Latorre y Miguel Galera (IDIADA); a José Manuel Rubio y María Elena Hidalgo (EIFFAGE); y, a Carolina Ríos, Eva Campmol, Christian Cortés y Javier Ainchil (FCC - Servià Cantó).

También quisiera reconocer a todo el personal del laboratorio del Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló por su colaboración en los distintos ensayos realizados como apoyo de esta tesis (Tomás, Camilo, Jordi y Robert). Tampoco se me olvida a todo el personal de administración por la paciencia que han tenido conmigo y su amabilidad por todos los temas burocráticos (Carmeta, Carme, Montse, Mercè, Bea y Eva). Tampoco se me olvida de la disposición a la búsqueda de artículos por parte del Servei d'Obtenció de Documents de la Biblioteca Rector Gabriel Ferraté, en especial a Josep.

Me gustaría agradecer a todos mis compañeros y amigos de la UPC siendo compañeros de viaje en el camino del doctorado. Entre ellos son: Ricardo, Liao, Júlia, Fran, Pau, Ana, Isaac, Luis, Rubén, André, Yohei, Francesc, Sandra, Martha, Amin, Renan, Tina, Carlos, Edu, Tai, Razmik, Juliana, Ahmed, Jorge, Mylene, Andressa, César, Lidi, Nayara, Sergio, Nacho y Luca. Espero no haberme olvidado de nadie, si más no, quisiera disculparme.

Por último, dedico a este último párrafo a todas las personas más allegadas a mi entorno. Por un lado, agradezco los momentos de distensión indispensables para la ejecución de la tesis que me han brindado al círculo más próximo de amigos (Carlos, Atha, Gerard, Jordi, Dani, Marc, Dean, Natalia, Juan, Iván y Aina). Y por otro lado, agradezco a todo el ámbito familiar ya sean mis tíos, mis primos y abuelos; y, al ámbito más próximo, de mi hermana (Paula, Montserrat y Armand), mis padres (Joan y Francesca) y mi pareja (Sònia).

Gracias a todos ellos.



## RESUMEN

Las **salidas de la vía** son el tipo de accidentes en carreteras más habituales cuyas consecuencias pueden repercutir en heridas graves o mortales. Con el fin de poder minimizar esta clase de accidentes se disponen de varios tipos de **sistemas de contención** para ayudar a redirigir o amortiguar el desvío del vehículo de la vía. Además para ayudar a evitar dicha anomalía es imprescindible un correcto acondicionamiento de la carretera en todos los sentidos y de la colaboración de todos los actores implicados. Debido a la importancia de este tipo de accidentes y con el objetivo de disminuirlos en el año 2010, a nivel europeo, se redactó la **norma EN 1317** que clasifica los sistemas de contención en **3 clases (A, B y C)** según su nivel de severidad de impacto. **En España**, mediante la Orden Circular 35/2014 solo se permite la instalación de sistemas de contención de **clase A o B**.

En el año 2011 no habían empresas españolas del sector de la construcción de barreras *in situ* en posesión de un certificado de clasificación A o B de sus productos. En consecuencia, las empresas EIFFAGE, FCC - SERVIÀ CANTÓ, GIVASA e IDIADA, junto con la colaboración de la UPC, definieron una estrategia de actuación para poder cumplir con los requisitos normativos requeridos para alcanzar la clasificación con una **nueva barrera de hormigón *in situ***. En este contexto, la presente Tesis Doctoral recoge el trabajo realizado en el proyecto centrándose particularmente en aquellos aspectos novedosos y genuinos de la investigación.

Para dar respuesta a este objetivo, la tesis se divide en tres líneas principales de investigación. La primera de ellas es el diseño de una **nueva forma de perfil de barrera**. Para ello, en base al método utilizado en esta tesis mediante el uso de ensayos de simulación y de impacto, esta línea de investigación se divide en dos partes: el **análisis de los resultados de la simulación**, y la **contrastación experimental** de los perfiles simulados propuestos para el ensayo de impacto. La segunda línea de investigación es el **diseño de una barrera con una cierta flexibilidad frente al impacto**. Esta línea surge de la necesidad de mejorar los niveles de severidad de la nueva forma de perfil propuesto. Para finalizar, la tercera línea de investigación se centra en el **diseño estructural** de la nueva barrera. Básicamente en esta parte se estudia el análisis estructural resistente en caso de impacto de un vehículo mediante el uso del método de las líneas de rotura.

En esta Tesis Doctoral se ha conseguido obtener **dos perfiles de barrera de hormigón *in situ* de clase B**. Estas dos soluciones han sido posibles gracias a la obtención de la mejor forma geométrica de perfil propuesta y de recurrir a varias medidas que conducen a un aumento de la deflexión dinámica de la barrera. Además, las dos barreras son resistentes frente al impacto de un vehículo del ensayo TB11 con factores de seguridad por encima de dos.





## ABSTRACT

The **outputs of the road** are the type most common road accidents whose consequences may affect serious injury or death. With the final purpose to minimize this kind of accidents have several types of **road restraint systems** to help redirect or absorb the turning of the vehicle on the route. Also to help prevent this anomaly is essential a correct design of the road in every way. Due to the importance of such accidents and in order to reduce them in 2010, in Europe, it was draft the European Standard **EN 1317**. This standard classifies road restraints systems in 3 impact severity **classes (A, B and C)**. **In Spain**, through the Orden Circular 35/2014 only it is allowed the installation of road restraint systems with **class A or B**.

In 2011 there were no Spanish construction companies to build concrete barriers *in situ* with class A or B. Consequently, the companies EIFFFAGE, FCC - SERVIÀ CANTÓ, GIVASA and IDIADA, along with the collaboration of the UPC, defined an action strategy to comply required regulatory requirements with a **new concrete barrier *in situ***. In this context, this thesis collect the work done particularly those aspects newer and more genuine of the research.

In order to achieve this objective, the thesis is divided in three parts. In the first part, the investigation focuses in designing a **new form of barrier profile**. Thus, this part of the research is divided in two according to the proposed methodology: **the analysis of results of the simulation** and **the experimental comparison** with the crash tests. In the second part, the research studies the **design of a flexible barrier against the impact**. This line of research arises from the need to improve the impact severity levels. Finally, the third part of the thesis is based on the **structural design** of the new barrier through the yield line theory.

As a result of study of this thesis has been able to obtain **two new concrete barriers** in situ **with class B**. These two barriers have been possible due to the achievement of the best profile barrier and to apply various actions to increase the dynamic deflection of the barrier. Also, the two barriers are resistant against the impact of a vehicle of the crash test TB11 with security factor above two.



## ÍNDICE GENERAL

### Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1.- Introducción .....	1
1.2.- Razón de ser y contexto .....	2
1.3.- Objetivos .....	3
1.4.- Método empleado y organización de la tesis .....	5

### Capítulo 2: ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1.- Introducción .....	9
2.2.- Tipos de barreras de seguridad.....	10
2.2.1- Descripción de las barreras según el material.....	10
2.3.- Normativa para el diseño de barreras .....	14
2.4.- Representividad de los índices ASI y THIV .....	16
2.5.- Perfil de barreras de hormigón <i>in situ</i> .....	19
2.6.- Modo de diseño de una barrera de hormigón <i>in situ</i> .....	21
2.6.1- Modelos de simulación.....	21
2.6.2- Ensayos de impacto a escala reducida .....	24
2.6.3- Modelos matemáticos.....	24
2.6.4- Datos estadísticos.....	25
2.7.- Metodología de construcción y dosificación .....	26
2.7.1- Proceso de fabricación actual.....	26
2.7.2- Características del hormigón deslizado.....	27
2.7.3- Características exigibles del hormigón deslizado.....	29
2.7.4- Hormigón con fibras.....	31
2.7.5- Dosificación tipo .....	33
2.7.6- Posibilidad de empleo de materiales reciclados .....	34
2.8.- Cálculo estructural .....	35
2.8.1- Cargas de impacto .....	35
2.8.2- Modo de rotura .....	40

**Capítulo 3: ASPECTOS GEOMÉTRICOS PARA EL DISEÑO DE LA BARRERA**

3.1.- Introducción .....	43
3.2.- Razón de ser de cada parámetro geométrico.....	44
3.3.- Evolución de las propuestas en la simulación.....	47
3.3.1- Condiciones de contorno del modelo de simulación .....	47
3.3.2- Desarrollo de las propuestas: perfiles 1 - 52 .....	47
3.3.3- Desarrollo de las propuestas: perfiles 53 - 74.....	59
3.3.4- Modificación del modelo inicial.....	72
3.3.5- Desarrollo de las propuestas: perfiles 100 - 119.....	82
3.3.6- Resumen de resultados de la simulación numérica .....	95
3.4.- Conclusiones .....	97

**Capítulo 4: CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL**

4.1.- Introducción .....	99
4.2.- Ensayos realizados .....	100
4.3.- Configuración básica de ensayo.....	101
4.3.1- Instalaciones.....	101
4.3.2- Construcción y dosificaciones empleadas.....	102
4.3.3- Ensayo de impacto .....	104
4.4.- Variables a analizar de cada ensayo .....	105
4.4.1- Condiciones de ensayo .....	106
4.4.2- Distancia de lanzamiento .....	111
4.4.3- Índices de severidad de impacto.....	112
4.4.4- Contraste con los resultados numéricos .....	112
4.4.5- Posición de contacto con el suelo .....	114
4.4.6- Ejes de giro .....	114
4.4.7- Marcas de rozamiento.....	116
4.5.- Resultados de los ensayos de impacto .....	118
4.5.1- Distancias de lanzamiento del vehículo .....	118
4.5.2- Índices ASI y THIV .....	119
4.5.3- Posición de contacto con el suelo .....	120
4.5.4- Ejes de giro durante el impacto.....	121
4.5.5- Marcas de rozamiento.....	124
4.5.6- Causa del vuelco del perfil de ensayo 51 3 <sup>er</sup> .....	126

4.6.- Conclusiones .....	127
--------------------------	-----

## Capítulo 5: ASPECTOS MECÁNICOS PARA EL DISEÑO DE LA BARRERA

5.1.- Introducción .....	129
5.2.- Razón de ser para flexibilizar la barrera.....	130
5.3.- Cambios potenciales a aplicar sobre la barrera .....	133
5.4.- Ensayos realizados .....	133
5.5.- Metodología común de cada ensayo .....	134
5.5.1- Dosificaciones empleadas .....	134
5.5.2- Estructura de la barrera según el perfil.....	135
5.6.- Variables a analizar de cada ensayo .....	136
5.6.1- Condiciones de ensayo .....	138
5.6.2- Punto de impacto .....	138
5.6.3- Desplazamiento de la barrera y su parametrización.....	139
5.7.- Simulaciones realizadas .....	140
5.7.1- Perfil 121.....	140
5.7.2- Perfil 122.....	143
5.8.- Resultados de los ensayos de impacto .....	145
5.8.1- Distancias de lanzamiento del vehículo .....	145
5.8.2- Índices ASI y THIV; y desplazamientos .....	146
5.8.3- Posición de contacto con el suelo .....	147
5.8.4- Ejes de giro durante el impacto.....	148
5.8.5- Marcas de rozamiento.....	151
5.8.6- Parametrización del desplazamiento de la barrera.....	152
5.8.7- Determinación del índice ASI .....	154
5.9.- Conclusiones .....	155

## Capítulo 6: DISEÑO ESTRUCTURAL

6.1.- Introducción .....	157
6.2.- Carga de impacto .....	158
6.2.1- Carga de diseño para el cálculo .....	158
6.3.- Método del cálculo de rotura .....	159
6.3.1- Casos reales de rotura .....	159
6.3.2- Forma de rotura y modo de cálculo adoptado.....	161

6.4.- Casos a estudiar .....	163
6.4.1- Perfil 51.....	163
6.4.2- Perfiles 122 y 123 .....	166
6.5.- Análisis de resultados.....	170
6.5.1- Perfil 51.....	171
6.5.2- Perfil 122.....	180
6.5.3- Perfil 123.....	186
6.6.- Conclusiones .....	191
<b>Capítulo 7: CONCLUSIONES</b>	
7.1.- Introducción .....	193
7.2.- Conclusiones generales.....	194
7.3.- Conclusiones específicas .....	195
7.4.- Futuras líneas de investigación .....	197
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>199</b>
<b>ANEJOS</b>	
Anejo 1. Información de normativas.....	213
Anejo 2. Estudio previo de dosificaciones anteriores .....	221
Anejo 3. Cálculo fuerza de impacto.....	225
Anejo 4. Método de las líneas de rotura.....	235
Anejo 5. Parametrización del desplazamiento.....	239
Anejo 6. Cálculo carga de impacto de un autobús (ensayo TB51).....	245
Anejo 7. Nomenclatura de los subcasos de rotura de los perfiles 51, 122 y 123 .....	249
Anejo 8. Cálculos de cada caso de rotura .....	255
Anejo 9. Ensayos experimentales del hormigón empleado en las barreras .....	279
Anejo 10. Ensayos de impacto .....	313
Anejo 11. Fichas técnicas de los perfiles simulados propuestos.....	339

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Factores a cumplir para la nueva barrera .....	3
Figura 1.2.	Esquema de la metodología a seguir .....	6
Figura 2.1.	(a) barrera metálica en servicio y barreras (b) bi-onda y (c) tri-onda .....	10
Figura 2.2.	Barreras de hormigón <i>in situ</i> (a) y prefabricado (b) .....	11
Figura 2.3.	Esquema de la representatividad de daños de los índices ASI y THIV .....	19
Figura 2.4.	Evolución histórica de los principales perfiles de hormigón .....	19
Figura 2.5.	Coche modelado en LMS (a), híbrido (b) y FE (c).....	22
Figura 2.6.	Esquema máquina deslizadora (a) y construcción de una barrera de hormigón <i>in situ</i> (b) i (c) .....	26
Figura 2.7.	Aspecto de escaso (a) y buen vibrado (b).....	28
Figura 2.8.	Porcentaje de árido fino y árido grueso. ....	31
Figura 2.9.	Fibras de acero (a), fibras plásticas (b) .....	32
Figura 2.10.	Árido reciclado (a), polvo de neumático (b) .....	34
Figura 2.11.	Modo de rotura propuesto por la AASHTO LFRD .....	40
Figura 2.12.	Propuestas de líneas de rotura (a), forma trapezoidal YL4 (b).....	41
Figura 2.13.	Modo de rotura entre juntas de un elemento barrera (a) y de un extremo (b) ....	42
Figura 3.1.	Parámetros considerados del perfil para el diseño .....	45
Figura 3.2.	Influencia de los parámetros a y b en el ASI.....	50
Figura 3.3.	Influencia de los parámetros a y $\alpha$ en el ASI.....	50
Figura 3.4.	Simulaciones de los perfiles 13 (a), 21 (b) y 22 (c) .....	52
Figura 3.5.	Influencia de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ en el ASI .....	53
Figura 3.6.	Influencia del parámetro a en el ASI.....	54
Figura 3.7.	Influencia de los parámetros a y $\gamma$ en el ASI .....	56
Figura 3.8.	Perfil 52.....	58
Figura 3.9.	Parámetros del perfil de barrera con 4 planos.....	60
Figura 3.10.	Influencia del parámetro $\gamma$ en el ASI.....	67
Figura 3.11.	Detalle zona de impacto de la llanta con el perfil (2º ensayo, perfil 51).....	68
Figura 3.12.	Parámetros del perfil con 5 planos.....	68



Figura 3.13. Perfiles 44 y 72.....	69
Figura 3.14. Gráfica ASI de los perfiles simulados 44 y 72 .....	70
Figura 3.15. Evolución del valor ASI de las diferentes propuestas de perfil .....	73
Figura 3.16. Comparación de los resultados ASI obtenidos en el modelo numérico y el real ...	74
Figura 3.17. Comparación de los resultados ASI obtenidos en los 2 modelos numéricos y el real .....	75
Figura 3.18. Influencia del parámetro a en el ASI.....	77
Figura 3.19. Influencia del parámetro b en el ASI .....	78
Figura 3.20. Influencia del parámetro f + g en el ASI.....	81
Figura 3.21. Influencia del ángulo $\alpha$ en el ASI .....	84
Figura 3.22. Influencia del ángulo $\gamma$ en el ASI .....	85
Figura 3.23. Influencia del ángulo $\beta$ en el ASI.....	85
Figura 3.24. Influencia del parámetro f + g en el ASI.....	88
Figura 3.25. Influencia del ángulo $\beta$ en el ASI.....	89
Figura 3.26. Influencia del ángulo $\gamma$ en el ASI.....	89
Figura 3.27. Influencia del ángulo $\gamma$ en el ASI .....	91
Figura 3.28. Influencia del parámetro b en el ASI .....	93
Figura 3.29. Influencia del parámetro k en el ASI.....	93
Figura 3.30. Evolución cronológica del ASI de los perfiles propuestos simulados .....	95
Figura 4.1. Perfiles de barrera propuestos para el ensayo de impacto.....	101
Figura 4.2. Pista de ensayo .....	102
Figura 4.3. Construcción de la barrera con los perfiles 51 (a) y 119 (b).....	103
Figura 4.4. Tolerancias de ensayo para la velocidad y ángulo de impacto .....	107
Figura 4.5. Posición del centro de gravedad y sus tolerancias.....	108
Figura 4.6. Dibujo con las variables consideradas de la fórmula de impacto de Olson .....	109
Figura 4.7. Medición distancia de lanzamiento.....	111
Figura 4.8. Evolución del ASI durante el impacto (ensayo 51 2°).....	112
Figura 4.9. Medición de la distancia y ángulo transversales .....	114
Figura 4.10. Ejes de giro y su sentido positivo adoptado .....	114
Figura 4.11. Evolución de los giros en los ejes X, Y y Z .....	115
Figura 4.12. Medición de $\varphi_x$ y de $w_x$ (a) y cálculo de los momentos actuantes (b).....	116
Figura 4.13. Medición de $\varphi_y$ (a); y de $\varphi_z$ y $w_z$ .....	116
Figura 4.14. Longitudes y ángulos de rozamiento del vehículo sobre la barrera.....	117
Figura 4.15. Resultados ASI y THIV de los 7 ensayos de impacto.....	120

Figura 4.16. Giros $\varphi_x$ (a), $\varphi_y$ (b) y $\varphi_z$ (c) de los ensayos de impacto .....	123
Figura 4.17. Relación entre el ASI y la longitud total de contacto con la barrera .....	125
Figura 5.1. Gráfica relación ASI - Deflexión dinámica de 296 ensayos de impacto tipo TB11 .....	131
Figura 5.2. Relación ASI – Deflexión dinámica de 77 ensayos de impacto TB11 según tipo de barrera.....	131
Figura 5.3. Desplazamiento en el tiempo según el tipo de barrera .....	132
Figura 5.4. Perfiles 51 y 119.....	134
Figura 5.5. Medición de la distancia del punto de impacto .....	139
Figura 5.6. Desplazamiento en el tiempo con la función valor del perfil 121 .....	140
Figura 5.7. Detalle del armado en la zona del corte del modelo.....	140
Figura 5.8. Esquema de fuerzas.....	141
Figura 5.9. Esquema modo de aplicación de la fuerza de impacto .....	142
Figura 5.10. Resultados de las simulaciones del perfil 121 en base a la distancia de impacto (L).....	143
Figura 5.11. Perfil 122 en la simulación (a) y detalle del pre-corte (b) .....	143
Figura 5.12. Giros en los ejes X, Y y Z de los perfiles 4 perfiles flexibles y los perfiles rígidos 51 2° y 119 .....	150
Figura 5.13. Relación de $k_D$ , $c_D$ y $p_D$ en función del $D_{m\acute{a}x}$ .....	153
Figura 5.14. Relación ASI – $D_{ASI}$ .....	155
Figura 6.1. Modo de rotura según el punto de impacto con una barrera con juntas.....	162
Figura 6.2. Proceso de formación de las líneas de rotura .....	162
Figura 6.3. Rotura por punzonamiento en el plinto (a) y cálculo del perímetro crítico (b) ...	170
Figura 6.4. Resultados caso 16 .....	180
Figura 6.5. Resultados de los subcasos 17 y 18.....	181
Figura 6.6. Resultados de los subcasos 19.....	182
Figura 6.7. Resultados de los casos 20 y 21.....	183
Figura 6.8. Resultados de los casos 22 y 23.....	185
Figura 6.9. Tensiones de cálculo de impacto según el espesor.....	185
Figura 6.10. Estado del perfil 122 después del impacto del ensayo TB11 .....	186
Figura 6.11. Resultados caso 24 .....	187
Figura 6.12. Resultados de los subcasos 25 y 26.....	187
Figura 6.13. Resultados de los subcasos 27.....	188
Figura 6.14. Resultados de los casos 28 y 29.....	189
Figura 6.15. Resultados de los casos 30 y 31.....	191



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	Ejemplos de barreras de seguridad .....	2
Tabla 2.1.	Principales ventajas e inconvenientes de las barreras metálicas y de hormigón ..	12
Tabla 2.2.	Tipos de barreras con sus principales ventajas y desventajas.....	13
Tabla 2.3.	Índices de severidad del impacto EN1317-2(2010) .....	15
Tabla 2.4.	Escala abreviada de lesión, AIS .....	18
Tabla 2.5.	Recomendaciones que debe cumplir un hormigón para barreras de seguridad <i>in situ</i> .....	29
Tabla 2.6.	Dosificaciones tipo.....	33
Tabla 2.7.	Cálculo de la carga de impacto de vehículos en el ámbito nacional .....	36
Tabla 2.8.	Cálculo de la carga de impacto de vehículos según distintas normativa .....	37
Tabla 3.1.	Distribución de las series y de los objetivos de los perfiles del 1 al 52 .....	48
Tabla 3.2.	Resultados de las simulaciones de los perfiles CSB (R1) e Inicial (R2).....	48
Tabla 3.3.	Resultados de las simulaciones 1 -12 .....	49
Tabla 3.4.	Resultados de las simulaciones 13 - 22 .....	51
Tabla 3.5.	Resultados de las simulaciones patrón (3) Serie 4 (35, 36 y 37) y Serie 5 (38, 39, 40 y 41) .....	54
Tabla 3.6.	Resultados de las simulaciones Serie 6 (42, 43, 44 y 45) y patrón (3) Serie 7 (46, 47 y 48) .....	55
Tabla 3.7.	Resultados de las simulaciones 49 - 52 .....	58
Tabla 3.8.	Valores de los parámetros a aconsejar.....	59
Tabla 3.9.	Instantáneas del máximo ASI de los ensayos de impacto del perfil 51.....	60
Tabla 3.10.	Distribución de las series y de los objetivos de los perfiles del 57 al 74 .....	61
Tabla 3.11.	Resultados de las simulaciones 57 - 62 .....	62
Tabla 3.12.	Conclusiones después de la 9ª Serie .....	63
Tabla 3.13.	Resultados de las simulaciones 62 - 66 .....	64
Tabla 3.14.	Instantáneas a los 65 ms de los perfiles 63 - 66 simulados.....	64
Tabla 3.15.	Conclusiones después de la 10ª Serie .....	65
Tabla 3.16.	Resultados de las simulaciones 67 - 71 .....	66
Tabla 3.17.	Conclusiones después de la 11ª Serie .....	67

Tabla 3.18.	Resultados de la simulación 72.....	69
Tabla 3.19.	Instantáneas de las simulaciones de los perfiles 44 y 72 .....	70
Tabla 3.20.	Resultados de las simulaciones de las propuestas 73 y 74 .....	71
Tabla 3.21.	Resultados de las simulaciones de los perfiles CSB, Inicial, 3, 35 - 37, 44 y 51 .....	76
Tabla 3.22.	Resultados de las simulaciones de los perfiles 73, 75 – 78,75', R4 y R5 .....	76
Tabla 3.23.	Conclusiones de las 13 simulaciones con el nuevo modelo .....	82
Tabla 3.24.	Distribución de las series y de los objetivos de los perfiles del 110 al 119 .....	82
Tabla 3.25.	Resultados de los perfiles 75/2 y 100 - 105.....	83
Tabla 3.26.	Conclusiones después de la 14ª Serie .....	85
Tabla 3.27.	Resultados de los perfiles 106 - 112b.....	86
Tabla 3.28.	Conclusiones después de la 15ª Serie .....	88
Tabla 3.29.	Resultados de las simulaciones de las propuestas 113 y 114 .....	89
Tabla 3.30.	Conclusiones después de la 16ª Serie .....	90
Tabla 3.31.	Resultados de las simulaciones de las propuestas 115 y 116 .....	91
Tabla 3.32.	Conclusiones después de la 17ª Serie .....	92
Tabla 3.33.	Resultados de las simulaciones de las propuestas 117 y 118 .....	92
Tabla 3.34.	Conclusiones después de la 18ª Serie .....	93
Tabla 3.35.	Resultados de la simulación propuesta 119.....	94
Tabla 3.36.	Conclusiones después de la 19ª Serie .....	95
Tabla 3.37.	Valores de los parámetros a aconsejar fruto de la simulación numérica .....	96
Tabla 4.1.	Objetivos específicos de los ensayos de impacto.....	100
Tabla 4.2.	Dosificaciones utilizadas.....	102
Tabla 4.3.	Secuencia del ensayo de impacto.....	103
Tabla 4.4.	Variables a analizar para cada ensayo de impacto.....	106
Tabla 4.5.	Tolerancias de los parámetros considerados .....	107
Tabla 4.6.	Valores de $a_{lat}$ y F de 7 casos .....	109
Tabla 4.7.	Resultados de las modificaciones sobre el ensayo de referencia .....	111
Tabla 4.8.	Desarrollo de las aceleraciones (X, Y, Z) y ASI del ensayo real y simulado del perfil R2.....	113
Tabla 4.9.	Distancias de lanzamiento .....	119
Tabla 4.10.	Resultados de distancias y ángulos transversales .....	121
Tabla 4.11.	Ángulos y velocidades de giro alrededor de los ejes X, Y y Z.....	122
Tabla 4.12.	Resultados de las marcas de rozamiento .....	124
Tabla 4.13.	Distribución de pesos en cada rueda.....	127

Tabla 5.1.	Acciones para flexibilizar la barrera.....	133
Tabla 5.2.	Ensayos de impacto realizados con barreras flexibles ante el impacto .....	134
Tabla 5.3.	Dosificaciones utilizadas .....	135
Tabla 5.4.	Estructura de los 4 perfiles diseñados .....	136
Tabla 5.5.	Variables a analizar para cada ensayo de impacto.....	137
Tabla 5.6.	Condiciones de ensayo .....	138
Tabla 5.7.	Resultados de las simulaciones en función del valor $\mu$ .....	141
Tabla 5.8.	Resultados de las simulaciones del perfil 121 en base a la distancia de impacto (L).....	143
Tabla 5.9.	Comparación de resultados de simulación con y sin perfil de porexpan.....	144
Tabla 5.10.	Distancias de lanzamiento.....	145
Tabla 5.11.	Resultados THIV, ASI, $D_{ASI}$ , $D_{máx}$ , $D_r$ y $D_e$ .....	146
Tabla 5.12.	Resultados de distancias y ángulos transversales .....	147
Tabla 5.13.	Ángulos y velocidades de giro en los ejes X, Y y Z .....	148
Tabla 5.14.	Resultados de las marcas de rozamiento .....	151
Tabla 5.15.	Valores $c_D$ , $k_D$ y $p_D$ de la función $D(t)$ de cada perfil.....	152
Tabla 5.16.	Resultados de la fórmula $D_{máx}$ .....	154
Tabla 6.1.	Valores de impacto para el ensayo TB11 de la norma EN 1317.....	158
Tabla 6.2.	Carga de diseño para el cálculo a rotura .....	159
Tabla 6.3.	Fotografías de rotura de barreras de hormigón continuas .....	160
Tabla 6.4.	Fotografías de rotura de barreras de hormigón discontinuas.....	161
Tabla 6.5.	Casos de rotura con carga puntual.....	163
Tabla 6.6.	Casos de rotura con carga lineal.....	164
Tabla 6.7.	Rango de valores geométricos de rotura .....	165
Tabla 6.8.	Características materiales y geométricas estudiadas para cada caso de rotura..	165
Tabla 6.9.	Total de casos considerados para el cálculo a rotura con el perfil 51.....	166
Tabla 6.10.	Casos de rotura para los perfiles 122 y 123.....	167
Tabla 6.11.	Casos de rotura adicionales de los perfiles 122 y 123 respecto al perfil 51.....	168
Tabla 6.12.	Total de casos considerados para el cálculo a rotura con los perfiles 122 y 123.	169
Tabla 6.13.	Resultados de los casos de rotura 1, 2 y 3 del perfil 51 .....	171
Tabla 6.14.	Resultados de los casos de rotura 4 y 5 del perfil 51 .....	173
Tabla 6.15.	Resultados de los casos de rotura 6, 7, 8, 9 y 10 perfil 51 simple.....	175
Tabla 6.16.	Resultados de los casos de rotura 6, 7, 8, 9 y 10 perfil 51 doble .....	176
Tabla 6.17.	Resultados de los casos de rotura 11, 12, 13, 14 y 15 del perfil 51 simple.....	177

Tabla 6.18. Resultados de los casos de rotura 11, 12, 13, 14 y 15 del perfil 51 doble .....	178
Tabla 6.19. Resumen de resultados del perfil 51 .....	179
Tabla 6.20. Resumen de resultados de los casos 16 - 21 .....	184
Tabla 6.21. Resumen de resultados de los casos 24 - 29 .....	190
Tabla 7.1. Perfiles 122 y 123.....	194

## LISTA DE SÍMBOLOS Y NOTACIONES

$a, b, g, h, l, m$	Longitudes geométricas de la parte del plinto del perfil tipo.
$a_{lat}$	Desaceleración de impacto perpendicular la barrera.
$a_R, a'$	Parámetros geométricos de rotura.
$a_x, a_y, a_z$	Aceleraciones en los ejes cartesianos X, Y y Z obtenidas en el tiempo en el ensayo de impacto.
$\widehat{a}_x, \widehat{a}_y, \widehat{a}_z$	Aceleraciones en los ejes X, Y y Z de referencia establecidas en la norma EN 1317 (2010).
A	Distancia del centro de gravedad del coche al frontal.
AIS	Escala Abreviada de Lesión ( <i>Abbreviated Injury Scale</i> ).
ASI	Índice de Severidad de Impacto ( <i>Acceleration Severity Index</i> ).
$ASI_{sim}$	Índice ASI de la simulación numérica.
2B	Anchura del vehículo.
$c, f, j, k$	Longitudes geométricas de la parte superior del perfil tipo.
$c_e$	Calor de tiempo en el punto de inflexión de la función elástica de D.
$c_D$	Valor de tiempo en el punto de inflexión de la función D.
cdg	Centro de gravedad del vehículo.
$d_a$	Desplazamiento de la barrera con punto de impacto en una rótula.
$d_b$	Desplazamiento de la barrera con punto de impacto en medio de una barra.
$d_h$	Canto útil de hormigón.
$d_l$	Distancia de lanzamiento del vehículo hasta la barrera.
$d_t$	Distancia transversal entre vehículo y la barrera.
D	Función 4-paramétrica del desplazamiento de la barrera.



$D_e$	Desplazamiento elástico de la barrera.
$D_{m\acute{a}x}$	Desplazamiento máximo de la barrera.
$D_r$	Desplazamiento remanente de la barrera.
$D_{ASI}$	Desplazamiento en el instante de ASI máximo.
$D_{100}$	Desplazamiento de la barrera a los 100 ms.
Delta-V	Método de medición de la desaceleración máxima.
$e$	Anchura de coronación del perfil tipo.
$E_{cin}$	Energía cinética.
$E_{cin\acute{e}tica, inicial}$	Energía cinética inicial.
$E_{deformaci\acute{o}n, final}$	Energía de deformación final.
$E_{final}$	Energía final.
$E_{inicial}$	Energía inicial.
$f_{ck}$	Resistencia característica a compresión del hormigón.
$f_{ck, min}$	Resistencia característica mínima a compresión del hormigón.
$f_l$	Fuerza lineal aplicada sobre la barrera.
$f_s$	Fuerza superficial aplicada sobre la barrera.
$f_R$	Carga lineal de rotura.
$F$	Carga de impacto perpendicular a la barrera .
$F'$	Fuerza ejercida para determinar el rozamiento.
$F_R$	Carga puntual de rotura.
$F_{\mu}$	Fuerza de rozamiento.
$g$	Aceleración de la gravedad ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).
$h_R$	Altura de aplicación de la carga de rotura.
$H$	Altura de rotura desde la coronación de la barrera.
HIC	Criterio de Lesión de la Cabeza ( <i>Head Injury Criterion</i> ).

$i$	Anchura de la base del perfil tipo.
IMD	Intensidad Media Diaria.
$k_e$	Valor de desplazamiento en el punto de inflexión de la función elástica de D.
$k_D$	Valor de desplazamiento en el punto de inflexión de la función D.
K	Rigidez lineal del vehículo.
L	Distancia entre corte y punto de impacto.
$L_c$	Longitud crítica de rotura en la coronación de la barrera.
$L_d$	Longitud de desfase morro - rueda.
$L_{dp}$	Longitud de remonte después del plinto.
$L_f$	Longitud de aplicación de la carga lineal $f_R$ .
$L_p$	Longitud de remonte del plinto.
$L_s$	Longitud parte superior de la barrera.
$L_t$	Longitud total.
$m^+$	Momento lineal positivo.
$m^-$	Momento lineal negativo.
M	Masa del vehículo.
$M'$	Momento del vehículo tras chocar contra la barrera.
$M^+$	Momento positivo de la junta de la barrera.
$M^-$	Momento negativo de la junta de la barrera.
$M_b$	Momento resistente de barandillas de puentes o similar.
$M_c$	Momento horizontal de la línea de rotura.
$M_{fis}$	Momento de fisuración de la sección.
$M_{pl}$	Momento plástico de la junta de la barrera.
$M_u$	Momento último de la sección.
$M_w$	Momento vertical de la línea de rotura.

$M_M$	Momento que ejerce la propia masa del vehículo.
$N$	Fuerza normal.
$OIV$	Velocidad de Impacto del Ocupante ( <i>Occupant Impact Velocity</i> ).
$ORA$	Aceleración del Ocupante en el Choque ( <i>Occupant Ridedown Accelerations</i> ).
$p_e$	Factor de forma de la función elástica de D.
$p_D$	Factor de forma de la función D
$p_a$	Posición del acelerómetro.
$p_\mu$	Fuerza de rozamiento del elemento de barrera entre cortes o pre-cortes.
$P$	Punto de contacto con el suelo del vehículo tras el impacto.
$r_M$	Distancia entre el punto P y la proyección del peso del vehículo.
$t$	Tiempo.
$t_{min}$	Tiempo inicial.
$THIV$	Velocidad Teórica de Impacto de la Cabeza ( <i>Theoretical Head Impact Velocity</i> ).
$u$	Perímetro crítico para el cálculo a punzonamiento.
$u_1, u_2$	Dimensiones de la superficie de la carga para el cálculo a punzonamiento.
$v$	Velocidad de impacto.
$v_x, v_y$	Velocidades en los ejes X e Y.
$w_x, w_y, w_z$	Velocidades angulares en los ejes X, Y y Z del vehículo.
$X, Y, Z$	Ejes cartesianos.
$X', Y', Z'$	Posición ejes cartesianos después de un instante de tiempo determinado.
$x_{cdg}, y_{cdg}, z_{cdg}$	Posición en los ejes cartesianos del cdg.
$\Delta$	Diferencia, incremento.
$\Sigma$	Suma.
$\Sigma F$	Sumatorio de fuerzas.
$\Sigma M_P$	Sumatorio de momentos respecto al punto P.

$\alpha, \theta, \gamma$	Ángulos de la parte del plinto del perfil tipo.
$\alpha_R$	Ángulo de rotura.
$\beta, \delta$	Ángulos de la parte superior del perfil tipo.
$\beta_i$	Ángulo de impacto.
$\gamma_c$	Coefficiente de seguridad o minoración de la resistencia del hormigón.
$\gamma_{dp}$	Ángulo de remonte después del plinto.
$\gamma_p$	Ángulo de remonte del plinto.
$\delta_c$	Deformación del vehículo.
$\delta_{v+b}$	Deformación del vehículo y de la barrera.
$\mu$	Coefficiente de rozamiento estático
$\tau_{rd}$	Tensión tangencial resistente del hormigón.
$\tau_{sd}$	Tensión tangencial de cálculo.
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	Ángulos de giro en los ejes X, Y y Z del vehículo.
$\psi_t$	Ángulo transversal del vehículo .



# CAPÍTULO 1

## Introducción

### 1.1.- INTRODUCCIÓN

Dentro de las tareas de gestión del tráfico y de las carreteras, la seguridad vial es uno de los factores prioritarios a tener en cuenta. Para ello, es necesario la participación de todos los actores implicados, ya sea, des de las administraciones públicas como propietarias y gestoras, los usuarios de la vía; y las empresas y asociaciones del sector como constructoras y gestoras.

La importancia dada a este asunto, a todos los niveles, ha dado como resultado que España haya cumplido el objetivo impuesto por la Comisión Europea de reducir a la mitad en el año 2010 el número de muertos en accidente de tráfico respecto al año 2001 a través del Programa de Seguridad Vial (2001-2010). Aun así, las cifras de muertos y heridos en las carreteras españolas siguen siendo inaceptables (1126 víctimas mortales y 4843 personas heridas en vías interurbanas en 2015, según la Dirección General de Tráfico, DGT (2015)), obligando este hecho a seguir trabajando, desarrollando nuevos planes de seguridad vial que incorporen medidas lo más eficaces posible. Con este objetivo en el año 2011 se inició el Segundo Programa de Seguridad Vial donde la Comisión Europea tiene como uno de los principales objetivos reducir a la mitad las víctimas de accidentes en carreteras para el año 2020.

Los tipos de accidentes en carreteras más comunes son **las salidas de la vía**. En el año 2015 esta clase de accidentes representaron tanto a España como en Europa el 40% del total de víctimas mortales en vías interurbanas. Por tanto, una de las claves para reducir la accidentalidad en carreteras es evitar el desvío de los vehículos de la calzada. Entre los factores a tener en cuenta para evitar estos accidentes están, desde un punto de vista técnico, el

adecuado acondicionamiento de la vía para facilitar una conducción cómoda y clara, una buena disposición de los elementos de señalización, campañas de concienciación para una conducción segura y responsable así como una buena infraestructura viaria.

Sin embargo, no es posible reducir a cero la probabilidad que un vehículo se salga de la vía de circulación. Para ello, con el objetivo de redirigir el vehículo y evitar las salidas de la calzada se disponen de sistemas de contención. Estos elementos actúan como atenuadores en caso de impacto, reduciendo la probabilidad de padecer daños mayores en caso de que no estuvieran. Entre los diferentes tipos de sistemas de contención destacan las barreras de seguridad. Las barreras de seguridad, dispuestos longitudinalmente a lo largo de la vía, son los sistemas de contención más abundantes. En la Tabla 1.1 se muestran ejemplos de diferentes tipos de barreras de seguridad presentes en carreteras.



*Tabla 1.1. Ejemplos de barreras de seguridad. (Fuente: GIVASA, 2013)*

## 1.2.- RAZÓN DE SER Y CONTEXTO

Debido a la importancia de este tipo accidentes y con el objetivo de disminuir los daños de los ocupantes del vehículo, en el año 2010 se redactó la **norma EN 1317** (Comité Europeo de Normalización, CEN, 2010). Esta norma de ámbito europeo clasifica los sistemas de contención según el nivel de contención, la anchura de trabajo (anchura del sistema de contención más la deflexión dinámica) y la severidad de impacto. Esta clasificación queda determinada por los resultados derivados de los ensayos de impacto sobre la barrera.

De acuerdo con la norma EN 1317, la medición de la **severidad de impacto** se especifica con la medición de dos índices: el índice ASI (Índice de Severidad de Impacto) y el índice THIV (Velocidad Teórica de Impacto de la Cabeza). En base a estos dos índices, los sistemas de contención se clasifican en 3 clases: A, B y C. La clase A presenta menores probabilidades de que los ocupantes padezcan daños que la clase B y esta, a su vez, menores probabilidades que la C. Por tanto es preferible un sistema de contención de clase A frente las clases B y C; y la clase B frente la C. En España, en la Orden Circular 35/2014 se obliga a que los sistemas de contención sean de **clase A o B**.





barrera (clase A o B); de esta manera se conseguirá una mayor probabilidad de que los usuarios que padezcan lesiones menos graves en caso de accidente. Para ello, es necesario la innovación para diseñar una nueva barrera frente a las ya existentes. Otro de los factores claves es la vertiente económica, la nueva barrera deberá ser económicamente viable para poder ser implementada en un futuro en carreteras. Para finalizar no se debe olvidar los aspectos medio ambientales y de sostenibilidad. La nueva barrera debe ser respetuosa con el medio ambiente ya sea el uso de materiales reciclados (como el empleo de áridos reciclados o polvo de neumático), o la reducción en el consumo de hormigón por metro lineal. Desde el punto de vista de sostenibilidad, la barrera deberá ser sostenible en el tiempo en toda su vida útil. Con el cumplimiento de estos 5 factores, la nueva barrera será una opción competitiva frente a otras barreras de hormigón *in situ* u otros tipos de barrera de seguridad.

Para responder al objetivo principal de esta tesis doctoral, se plantean unos **objetivos específicos**, los cuales se presentan a continuación, agrupados en cuatro áreas:

#### Aspectos geométricos del perfil de barrera

- Diseño de una nueva barrera adaptando la geométrica de perfil a necesidades de índole mecánica y constructiva.
- Determinar la razón e incidencia de cada uno de los parámetros geométricos.
- Identificar cuáles son los parámetros geométricos que inciden en la severidad del impacto y establecer un rango de valores para cada uno.

#### Contrastación experimental de las diferentes formas de perfil propuestas

- Contrastar los resultados del índice ASI obtenidos numéricamente con los ensayos de impacto real.
- Evaluar la magnitud de los distintos parámetros identificados como determinantes en fase de impacto y post-impacto en base a los ensayos llevados a cabo.
- Evaluar la sensibilidad de los resultados de los ensayos de impacto frente a las tolerancias que permite la normativa vigente (EN 1317 (2010)).

#### Aspectos mecánicos para el diseño de la barrera

- Diseño de una nueva barrera, adaptando la flexibilidad de su respuesta deformacional ante el impacto, para conseguir el nivel de seguridad exigido.
- Contrastar los resultados del índice ASI de los ensayos de la simulación con los ensayos de impacto real.
- Correlacionar el desplazamiento medido y la severidad de impacto en base a las modificaciones mecánicas realizadas.

### Diseño estructural

- Determinar la resistencia a rotura de una barrera de hormigón con los perfiles propuestos en esta tesis doctoral.
- Concluir la forma y el modo de fallo de la barrera más adecuada ante el impacto de un vehículo.
- Precisar el espesor mínimo de coronación para resistir el impacto.
- Ver la posibilidad de la sustituir el armado convencional por fibras de acero o plásticas con responsabilidad estructural.

## 1.4.- MÉTODO EMPLEADO Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En esta tesis se ha desarrollado una **metodología de diseño** para poder obtener una nueva barrera de hormigón *in situ*. La base de este método se fundamenta en el uso de un modelo de simulación con diferentes propuestas de barrera y su posterior contrastación experimental con ensayos de impacto real. Para llevar a cabo este método de manera satisfactoria es necesario realizar un adecuado análisis de los resultados tanto de la simulación como los ensayos de impacto para conseguir la mejor barrera posible de acuerdo con los objetivos planteados en especial énfasis en el factor de seguridad. Para finalizar, una vez se determine la nueva barrera se comprobará su resistencia estructural a impacto.

En base a los objetivos y al método empleado de esta tesis, en la Figura 1.2 se presenta un esquema de la organización por capítulos para abordar la investigación.

En primer lugar, se encuentra el **Capítulo 1** que sirve como capítulo introductorio del estudio de la presente Tesis Doctoral. En él, se expone la **razón de ser** y las **motivaciones** para realizar el diseño de una nueva barrera de hormigón *in situ*. Además, se muestra la **metodología** de diseño seguida y la organización de la tesis.

En segundo lugar, en el **Capítulo 2**, se desarrolla un **estado del arte** y en el que se establecen las necesidades de plantear la presente tesis. Estas necesidades se traducen en los objetivos específicos enumerados anteriormente y que establecen cuatro áreas de investigación dependientes entre sí y expuestas en los Capítulos 3 a 6.

En los **Capítulos 3 y 4** se basa en el estudio del **diseño de una nueva forma de perfil de barrera de hormigón *in situ***. En esta fase de la investigación la barrera se comporta como un sólido rígido empotrado ante el impacto del vehículo. En base al método utilizado en esta tesis, mediante el uso de ensayos de simulación y de impacto, esta línea de investigación se divide en dos capítulos: el **Capítulo 3**, que comprende el **análisis de los resultados de la simulación**, y el **Capítulo 4**, que contiene la **contrastación experimental** de los perfiles propuestos simulados con los de los ensayos de impacto.

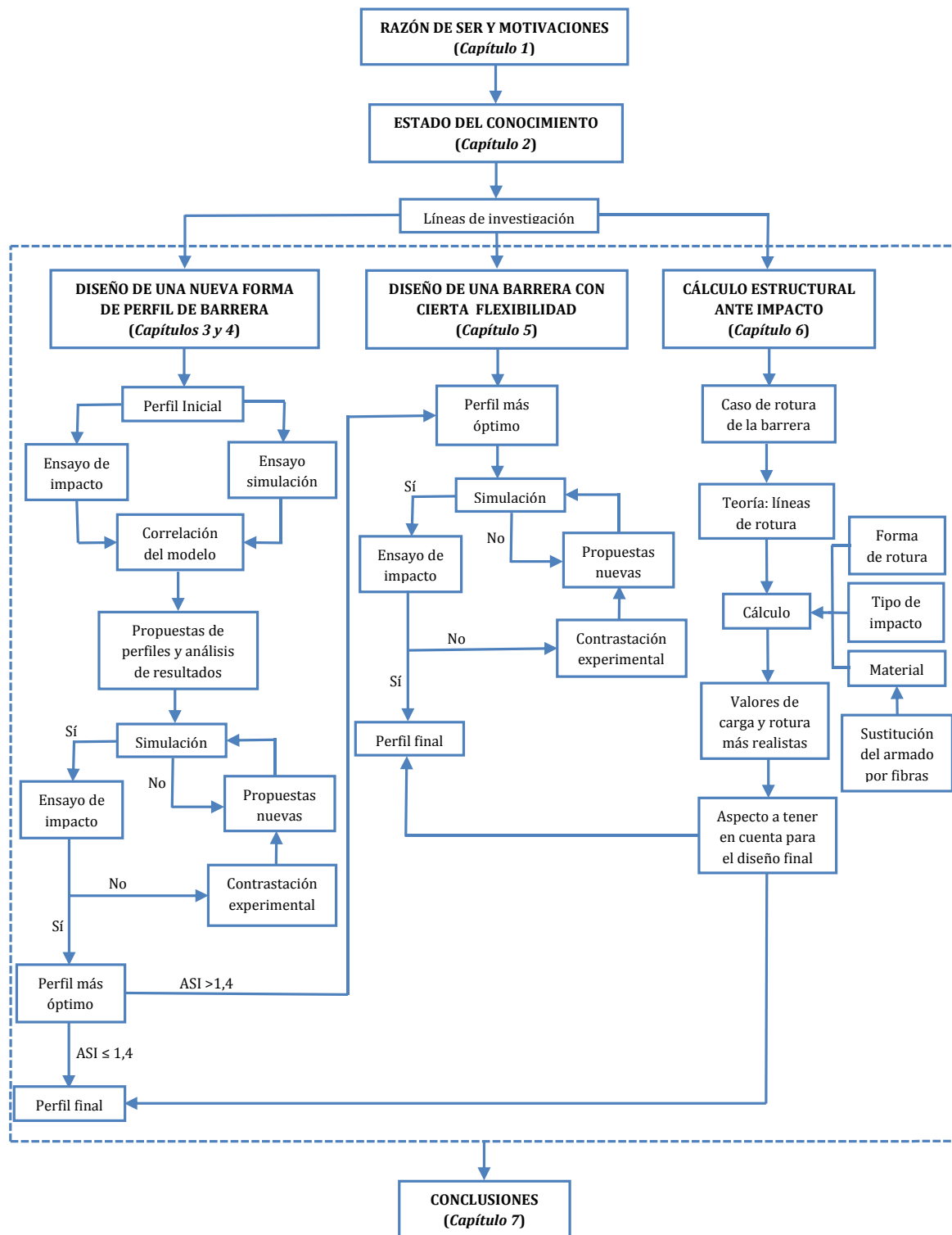


Figura 1.2. Esquema de la metodología a seguir.

El método para conseguir la mejor forma de perfil se inicia con la propuesta de un perfil inicial en base a la experiencia y el conocimiento actual. Con este perfil inicial se procede a ensayar, donde se correlaciona el valor del modelo con el del ensayo de impacto. Tras dar por

válido el modelo para representar la realidad, se proponen nuevas propuestas de perfiles y se ensayan en el modelo de simulación hasta conseguir un perfil apto para el ensayo real.

Si el resultado del ensayo de impacto no es satisfactorio o puede ser susceptible de mejora, se correlaciona el modelo y se proponen nuevos perfiles para simulación. En caso contrario, si el perfil obtenido es el mejor posible, pueden suceder dos casos: un perfil  $ASI > 1,4$  o un perfil  $ASI \leq 1,4$ . Si se trata de un perfil con  $ASI \leq 1,4$ , este perfil cumple con el objetivo principal de seguridad. En caso contrario, este perfil será la base de la segunda línea de investigación.

Una vez concluidas las investigaciones de los capítulos 3 y 4, el estudio se centra en el **diseño de una barrera con una cierta flexibilidad ante el impacto (Capítulo 5)**. El método de obtención de la nueva barrera sigue las mismas pautas que la primera línea de investigación pero con el añadido de las particularidades de estas barreras debido a su deformabilidad.

Para acabar con las diferentes líneas de investigación de esta tesis se estudia **diseño estructural** de la nueva barrera (**Capítulo 6**). Básicamente en esta parte se estudia el análisis estructural en caso de impacto de un vehículo. La teoría que se aplica para su cálculo es el método de las líneas de rotura. Mediante este método, la rotura vendrá precedida según la forma de fallo propuesta, el tipo de carga de impacto y el material empleado en la barrera. Una vez finalizado este apartado se deberá tener en cuenta los resultados finales obtenidos para el diseño del perfil definitivo de esta tesis.

Por último lugar, la tesis finaliza con la redacción (**Capítulo 7**) de las **conclusiones** más relevantes que se derivan del trabajo realizado y se proponen las perspectivas futuras con el objetivo de profundizar y complementar el trabajo realizado.



## CAPÍTULO 2

# Estado del conocimiento

### 2.1.- INTRODUCCIÓN

Tras centrar el tema de estudio y los objetivos en el capítulo anterior, en el presente capítulo se realiza una revisión del estado del conocimiento en relación a las **barreras de seguridad de hormigón *in situ*** en carreteras. El **objetivo principal** de este capítulo es cubrir el conocimiento que se tiene hasta la fecha de aquellos aspectos que se abordarán en esta Tesis Doctoral. Este estado del arte se divide en los siguientes siete bloques:

- 1º. Tipos de barreras de seguridad en carreteras.
- 2º. Normativas de referencia para el diseño de una barrera de seguridad tanto a nivel europeo como americano.
- 3º. Significado y representatividad de los índices de severidad de la norma EN 1317 (2010).
- 4º. Geometrías predominantes para los perfiles de barrera existentes.
- 5º. Diseño de barreras en base a la respuesta del vehículo durante el impacto.
- 6º. Comprobación estructural de la barrera en fase de rotura.
- 7º. Método constructivo y tipo de hormigón a utilizar en esta clase de barreras.

A continuación se exponen por apartados cada uno de los temas estudiados que servirán como punto de partida para el diseño de una barrera de hormigón *in situ* de esta Tesis Doctoral.

## 2.2.- TIPOS DE BARRERAS DE SEGURIDAD

Las salidas de la vía provocan aproximadamente entre el 30 y el 40 % de los accidentes mortales que se producen en carreteras, por lo que es necesario reducir el número de accidentes de este tipo mejorando la infraestructura y aumentando la visibilidad (Corredor, 2012). Ahora bien, cuando este tipo de accidentes se producen, hay que intentar minimizar sus consecuencias eliminando los obstáculos en los márgenes de la calzada (García et al., 2007) para que el vehículo discorra sin chocar ni volcar. En caso de que no sea posible eliminar los obstáculos, se corresponderá a la instalación de sistemas de contención que reduzcan los efectos del impacto en los ocupantes y protejan a otros conductores que circulan en sentido contrario (Bartolomé y Díaz, 2011).

Existen una gran variedad de sistemas de contención de vehículos, de diferentes materiales y geometrías, los cuales se pueden clasificar en las siguiente categorías (Corredor, 2012): (1) barreras de seguridad; (2) pretilas; (3) atenuadores de impacto; (4) terminales; (5) transiciones; (6) lechos de frenado y, (7), sistemas de protección para motociclistas, siendo las barreras de seguridad el sistema de contención cuyo uso está más extendido.

Asimismo, también hay una gran diversidad de barreras de seguridad según el tipo de instalación que se lleve a cabo y los materiales constitutivos empleados. Entre estas, las más frecuentemente utilizadas son las metálicas y las de hormigón (Grzebieta et al., 2005). En esta misma línea, un estudio del *Institute for Road Safety Research (SWOV)* (1986) categoriza las barreras en dos grupos: (1) las deformables (metálicas) y, (2), las no deformables (de hormigón). Según Calloway (1993), Clay et al. (2005) y Hafeez et al. (2012), las barreras se pueden clasificar también según su deformabilidad ante el impacto: rígidas (barreras de hormigón), semirígidas (barreras metálicas) y flexibles (barreras metálicas con muy baja rigidez o barreras con cables).

### 2.1.1- Descripción de las barreras según el material

Las **barreras metálicas** están formadas, generalmente, por una serie continua de elementos tipo raíles, postes y separadores (Grzebieta et al., 2005). En la Figura 2.1.a se muestra una barrera metálica y en las Figuras 2.1.b y c los dos tipos de barrera más comunes de tipo metálico.

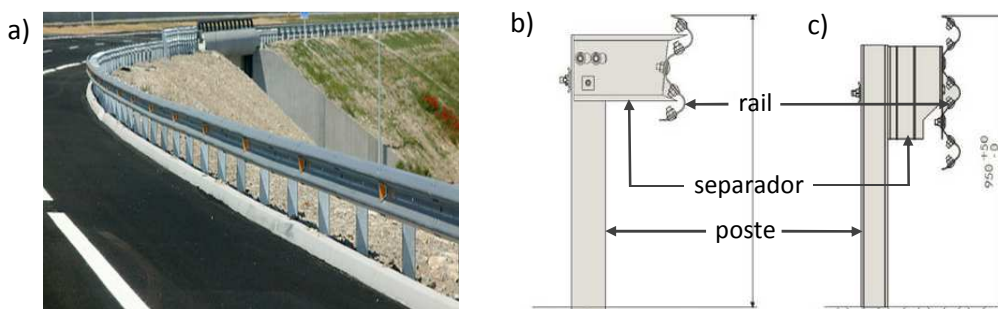


Figura 2.1. (a) barrera metálica en servicio y barreras (b) bi-onda y (c) tri-onda. (Fuente: GIVASA)

Existen múltiples formas y configuraciones, siendo las más usuales las barreras bi-onda (Figura 2.1.b) y tri-onda (Figura 2.1.c), (del inglés *W-beam* y *Thrie-beam*, respectivamente) ((Ray and McGinnis, 1997) y (Leonardi y Pappalardo, 2000)).

La estructura de la barrera metálica se diseña persiguiendo que su conjunto se deforme y amortigüe el impacto de un vehículo de acuerdo con el estudio realizado por Leonardi y Pappalardo (2000). Para niveles de contención elevados, las barreras pueden reforzarse recurriendo a al uso de rigidizadores, pretiles, colocación de un doble rail o un refuerzo en la cimentación de la base del poste (Whitworth et al., 2003).

La **barreras de hormigón** se dividen en dos grupos (ver Figura 2.2): (1) las prefabricadas y, (2), las ejecutadas *in situ* (Bartolomé y Díaz, 2011).

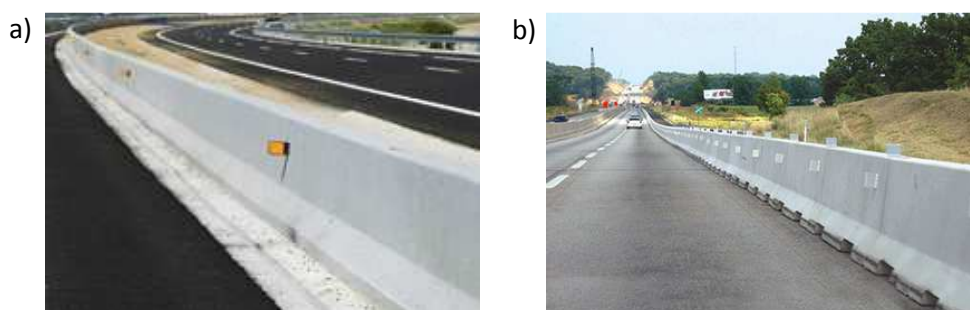


Figura 2.2. Barreras de hormigón *in situ* (a) y prefabricado (b).  
(Fuente: GIVASA y Federal Highway Administration U.S., 2013)

Por una parte, las barreras de hormigón prefabricadas son piezas prismáticas entre 5 y 6 metros que se transportan mediante camiones y se colocan en obra con grúas. Para un uso temporal, esta longitud se puede reducir hasta 2 m en aras a facilitar su manejo (López, 2011). La unión entre piezas suele realizarse recurriendo a sistemas sencillos de acoplamiento o de sujeción metálicos.

Por otra parte, las barreras de hormigón *in situ* son barreras construidas mediante encofrado deslizante sobre la misma zona de instalación, dando lugar a un elemento totalmente continuo en el sentido longitudinal de la carretera.

La barrera *in situ* se comporta como elemento rígido ante el impacto de un vehículo, mientras que en las prefabricadas puede variar según varios aspectos de carácter tecnológico. En este sentido, según la fijación empleada entre los elementos prefabricados y la sujeción con el suelo, las barreras prefabricadas pueden presentar cierta flexibilidad ante el choque (Bonin et al., 2004).

En la Tabla 2.1 se presentan las ventajas e inconvenientes de las barreras metálicas, las barreras de hormigón prefabricado y las barreras de hormigón *in situ*.



Tipo de barrera	Ventajas	Inconvenientes
Metálicas	Baja severidad del impacto Bajo coste inicial	Peligrosidad para motoristas Alto mantenimiento Reponer en caso de impacto
Hormigón prefabricado	Uso temporal o indefinido Mantenimiento mínimo	Alto coste inicial Reponer en caso de impacto
Hormigón <i>in situ</i>	Rápida construcción Mantenimiento mínimo Funcional después de impacto	Alta severidad de impacto

Tabla 2.1. Principales ventajas e inconvenientes de las barreras metálicas y de hormigón. (Fuente: varias)

Las barreras metálicas tienen como principales ventajas, la baja severidad de impacto y el bajo coste de instalación. Según Amato et al. (2011) el coste total de una barrera metálica oscila entre 30,0 – 50,0 €/m frente a los 80,0 – 110,0 €/m de una barrera de hormigón. Específicamente, Bartolomé y Díaz (2011) determinan que el rango de costes de una barrera metálica de doble valla es de 56,8 a 57,6 €/m mientras que el de una barrera de hormigón *in situ* es de 57,3 €/m. Por tanto, a nivel de costes las barreras de hormigón *in situ* se pueden equiparar a las barreras metálicas. Además, se debe añadir que las barreras metálicas requieren de un alto mantenimiento tal y como señalan los estudios de Amato et al. (2011) y Kusama (2004), cosa que no ocurre con las de hormigón *in situ*.

Briglia et al. (1983), Sturt y Fell (2009) y Hafeez et al. (2012) ponen de manifiesto que las barreras de hormigón tienen un mayor índice de severidad frente al impacto que en el caso de barreras metálicas. En este sentido, la investigación realizada por Bonin et al. (2004) refleja la necesidad de diseñar una barrera por módulos de hormigón (barrera prefabricada) para reproducir en cierto grado el comportamiento de las barreras metálicas y garantizar así un índice de severidad frente al impacto más reducido. Como contrapartida, la barrera prefabricada de hormigón requiere la reposición de los módulos dañados tras el evento de impacto. Esto último no ocurre con las barreras de hormigón *in situ*. La *Federal Highway Agency* de Estados Unidos (FHWA) estima que el 10 % de los problemas de congestión en las carreteras están directamente relacionados con las tareas de mantenimiento y reposición (Bartolomé y Díaz, 2011).

Un estudio de Sicking y Ross (1985) de la FHWA establece un análisis del coste – beneficio entre el uso de barreras metálicas y de hormigón. En esta investigación se tienen en cuenta factores como el nivel de contención, la energía de impacto (*Severity Impact (IS)*), la vida útil, el coste de reparación, el volumen de tráfico de la vía, el coste social y la distancia de la vía a la barrera. Entre estos aspectos estudiados el estudio destaca del bajo mantenimiento que requieren las barreras de hormigón que las hacen competitivas frente a las metálicas. Se concluye que la decisión entre instalar una barrera metálica o de hormigón depende del volumen de tráfico de la vía y de la anchura de trabajo de la barrera disponible.

Existen otros tipos de barreras cuyo uso es menos frecuente (cables, plástico, mampostería, madera). En la Tabla 2.2 se muestran las principales ventajas e inconvenientes de cada uno de estos tipos.

Tipo de barrera	Ventajas	Inconvenientes
<p>Cables</p> 	<p>Gran flexibilidad para amortiguar el impacto</p>	<p>Peligrosidad para motoristas Mantenimiento elevado Efectividad condicionada a tipo y geometría de vehículo</p>
<p>Plástico</p> 	<p>Facilidad de transporte para uso temporal Rellenable con material granular o con agua</p>	<p>Fragilidad ante impacto</p>
<p>Mampostería</p> 	<p>Encaje con un entorno rústico</p>	<p>Alto coste inicial Alta severidad de impacto</p>
<p>Madera</p> 	<p>Encaje en un entorno rústico</p>	<p>Mantenimiento elevado Elevado coste</p>

Tabla 2.2. Tipos de barreras con sus principales ventajas y desventajas. (Fuente: varias)

Carey y Grzebieta, (2004) y Grzebieta et al. (2005) describen las barreras con cables y las barreras temporales de plástico. Otras opciones más rústicas son las de madera o de mampostería incorporadas por la *Federal Highway Administration* de USA (*California Department of Transportation*, 2002). Según la zona de implementación y su entorno, la autoridad competente puede obligar a cumplir unos estándares de estética; ejemplo de ello es la *Irish National Roads Authority* que propone sustituir las barreras convencionales de hormigón o metálicas por materiales naturales cumpliendo con la norma EN 1317 (Amato et al., 2011).

También se puede dar el caso de utilizar una barrera mixta, combinando distintos materiales para mejorar sus prestaciones. Un posible ejemplo son las barreras compuestas por hormigón hasta media altura y un perfil metálico empotrado en la coronación tal y como lo prevé la guía americana LFRD (2012). Otros ejemplos son el uso de separadores de madera en

barreras metálicas (Grzebieta et al., 2005; Amato et al., 2011) o incluso la utilización de gaviones (Jones, 1999). También existen módulos de barrera metálica similares a las barreras prefabricadas de hormigón (López, 2011).

### 2.3.- NORMATIVA PARA EL DISEÑO DE BARRERAS

Las barreras de seguridad deben cumplir una serie de requerimientos para desempeñar de manera adecuada su función como sistema de contención de vehículos. Tanto a nivel normativo en Europa con la norma EN 1317 (2010) como en Estados Unidos la norma MASH, *Manual for Assessing Safety Hardware* de la AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) (2009) (norma actualizada de la NCHRP 350), el resultado del diseño de una barrera de seguridad debe garantizar 3 aspectos fundamentales:

- Retener el vehículo de forma controlada, es decir, evitando: rebasar la coronación, vuelcos, penetración ni desprendimientos de la barrera. Asimismo, durante el impacto del vehículo, la barrera debe mantener su funcionalidad de contención. Este parámetro se rige según el **nivel de contención** establecido en la norma de referencia.
- Debe desacelerar el vehículo dentro de unos límites con el fin de minimizar el riesgo de lesiones de los ocupantes del vehículo. Estos límites así como los parámetros de referencia a medir en los ensayos de **severidad de impacto** están también recogidos en las normativas.
- **Redirigir el vehículo a la vía** minimizando las puntas de aceleración en el habitáculo del vehículo y garantizando que no se invade el carril adyacente en el proceso de reincorporación al carril de circulación original.

En España, la Orden Circular 35.2014 establece los criterios que justifican su instalación mediante la medición del riesgo de accidente. El riesgo de accidente viene determinado según la velocidad de proyecto de la carretera, la intensidad media diaria (IMD), la presencia de pasos a nivel, nudo circulatorio, presencia de obstáculos entre otros aspectos. En el ámbito americano, la idoneidad de la colocación de una barrera de seguridad dependerá únicamente de la IMD de la vía (norma MASH).

La norma EN 1317 clasifica los sistemas de contención en función de tres factores: (1) el nivel de contención, (2) la severidad del impacto y (3) la anchura de trabajo (Bartolomé y Díaz, 2011). Con el objetivo de determinar estos parámetros, la norma establece una serie de ensayos de impacto con turismos, camiones, autocares y camiones articulados a velocidades entre los 65 y 110 Km/h, con un ángulo de choque de entre 8 y 20° y con una masa del vehículo que varía entre los 900 a 38000 Kg. En el Anejo 1 se muestran todos los ensayos de impacto de la citada norma, los niveles de contención establecidos según los resultados de los ensayos específicos y la clasificación en base a la anchura de trabajo.

Generalmente, la caracterización de un sistema de contención requiere de dos ensayos de impacto: uno con un vehículo ligero y otro con un vehículo pesado. El ensayo con vehículo ligero especifica el nivel de severidad de impacto; mientras que, el vehículo pesado determina el nivel de contención y la anchura de trabajo.

Para barreras con contención normal, alta o muy alta se requiere del ensayo TB11 para evaluar el riesgo de lesión. Este ensayo se caracteriza por el uso de un vehículo ligero de 900 Kg, con una velocidad de 100 Km/h y un ángulo de impacto de 20°. Los parámetros que definen la severidad de impacto son los índices ASI y THIV.

El **índice ASI** (*Acceleration Severity Index*) en función del tiempo  $t$  de medición,  $ASI(t)$ , es un parámetro con el que se estima de forma indirecta, a través del valor de las aceleraciones, los movimientos que tiene una persona situada en el asiento delantero más cercano al lugar del impacto del vehículo. Este parámetro es adimensional y se obtiene empíricamente mediante la ecuación 2.1 propuesta en la norma EN 1317.

$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{\overline{a_x}}{\overline{a_x}}\right)^2 + \left(\frac{\overline{a_y}}{\overline{a_y}}\right)^2 + \left(\frac{\overline{a_z}}{\overline{a_z}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{a_x}{12g}\right)^2 + \left(\frac{a_y}{9g}\right)^2 + \left(\frac{a_z}{10g}\right)^2} \quad [\text{Ec. 2.1}]$$

La ecuación 2.1 plantea la evolución del ASI en  $t$  como el módulo adimensional de la aceleración del centro de masas, siendo  $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$  las aceleraciones en los ejes cartesianos (X, Y, Z) obtenidas en el ensayo de choque mientras que  $\overline{a_x} = 12g$ ,  $\overline{a_y} = 9g$ ,  $\overline{a_z} = 10g$  ( $g$ , aceleración de la gravedad) son las aceleraciones de referencia establecidas en la EN 1317.

El valor máximo de ASI obtenido experimentalmente se compara con el valor de referencia establecido para cada nivel de severidad. En este sentido, la EN 1317 propone una ordenación de las barreras de seguridad formada por 3 niveles de severidad en base al valor de ASI (ver Tabla 2.3).

Índice de severidad del impacto	Valor de los índices		
A	ASI ≤ 1,0	y	THIV ≤ 33 km/h
B	1,0 < ASI ≤ 1,4		
C	ASI > 1,4		

Tabla 2.3. Índices de severidad del impacto EN1317-2(2010).

Los resultados recogidos en la Tabla 2.3 ponen de manifiesto que a igualdad de contención y desplazamiento transversal durante el impacto, serán preferibles las barreras con un índice de severidad A sobre las barreras tipo B, y las de B sobre las C (Bartolomé y Díaz, 2011).

El **índice THIV** (*Theoretical Head Impact Velocity*) es la velocidad con la que la cabeza del conductor golpea en el interior del vehículo al impactar este contra la barrera de la seguridad. La magnitud de esta velocidad determina la gravedad del choque. En la norma EN 1317 limita

del THIV a 33 Km/h. El modo de medición de esta velocidad es el módulo vectorial de las velocidades en dirección X ( $v_x$ ) e Y ( $v_y$ ) (ver ecuación 2.2):

$$\text{THIV}(t) = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t)} \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

En la Orden Circular 35.2014, la selección del sistema de contención para un nivel de contención establecido viene fijado por el riesgo de accidente y la IMD (ver Anejo 1). En referencia al nivel de severidad, en la misma Orden sólo se admiten índices de severidad A y B para barreras de seguridad. A nivel español, no se admite el empleo de barreras de seguridad C, salvo casos excepcionales que se justifique adecuadamente y requiriéndose autorización expresa del organismo competente.

La norma americana MASH recoge una tabla de parámetros de referencia que debe cumplir una barrera de seguridad en los ensayos de caracterización (ver Anejo 1). Estos parámetros están asociados al: comportamiento estructural de la barrera y del vehículo, riesgo de lesiones de los ocupantes del vehículo y a la trayectoria del vehículo tras el impacto. Respecto a las mediciones de la severidad de impacto, la MASH propone medir la velocidad de impacto del ocupante (*Occupant Impact Velocity, OIV*), parámetro homólogo al índice THIV europeo, estableciendo un valor máximo de referencia de 9 m/s (33 Km/h); si bien, este valor en circunstancias justificadas podría rebasarse, siendo el valor máximo en tal caso de 12 m/s (43 km/h).

El otro parámetro que debe registrarse durante el ensayo es la desaceleración del ocupante en la choque (*Occupant Ridedown Accelerations, ORA*). En esta línea, el valor máximo tanto longitudinal como lateral del ORA recomendado es de 15g, pudiéndose alcanzar hasta los 20g.

## 2.4.- REPRESENTATIVIDAD DE LOS ÍNDICES ASI Y THIV

La idoneidad de la clasificación de las barreras en clase A, B o C de la norma EN 1317 (2010) es cuestionada por el estudio realizado por Sturt y Fell (2009). Esta investigación mostró que aunque existe una correlación entre el índice ASI y el riesgo de lesión, el límite establecido (ASI = 1,4) entre clase B y C no es diferencial a nivel de la gravedad de la lesión de los ocupantes del vehículo. Contrariamente, en este mismo estudio se confirma que el valor de 33 km/h fijados para el índice THIV establece diferencia entre riesgos aceptables o inaceptables de lesiones para cualquier clase de barrera. Estas afirmaciones fueron apoyadas con 3 ensayos y 50 simulaciones numéricas del ensayo de impacto TB11 contra el perfil *Concrete Step Barrier* según la norma EN 1317.

El mismo estudio incide que el índice ASI está basado exclusivamente en el movimiento del vehículo y no a la respuesta del ocupante. Independientemente de la normativa, el aumento de ASI se asocia a un mayor riesgo de lesión. Sin embargo, los valores de referencia de  $\widehat{a}_x$ ,  $\widehat{a}_y$ ,

$\widehat{a}_z$  (ver ecuación 2.1) propuestos en la EN 1317 se asimilaron de los obtenidos para las pruebas de seguridad de pilotos de combate sujetos a la acción de los asientos propulsados. En consecuencia, este tipo de ensayos y de fenómenos físicos que suceden son poco representativos de los fenómenos que suceden en el escenario de impacto de un vehículo contra una barrera.

En definitiva, el estudio incide en que las 3 clases establecidas por la EN 1317 son arbitrarias y sin ningún vínculo demostrado entre la clase y riesgo de lesiones. Incluso, los autores demostraron mediante un modelo de elementos finitos adecuadamente calibrado que simulaba el ensayo de impacto que valores de ASI y THIV por debajo de 1,7 y 31 Km/h, respectivamente, conducen a probabilidades de lesión muy reducidas.

La investigación realizada por Ferdous et al. (2011) indica que aunque el índice ASI muestra correlación con el riesgo de lesiones, no existe una diferencia significativa de padecer mayores o menores lesiones entre barreras de clase B o C. En cambio, el índice THIV sí que es un indicador fiable para predecir un riesgo de lesión aceptable o inaceptable con el valor límite de 33 Km/h de la norma EN 1317.

Por Gabauer y Glaber (2005, el índice ASI es un buen indicador para medir las lesiones en choques frontales con ocupantes con cinturón y con airbag. Además, concluyen que para valores de ASI iguales o inferiores a 1,0 las lesiones producidas son leves o nulas.

En otros trabajos se ha analizado la relación entre el índice ASI respecto a otros índices no catalogados por la EN 1317. Uno de los índices más empleados es el índice HIC (*Head Injury Criterion*) que permite estimar la gravedad de la lesión de cabeza mediante una ecuación en la que intervienen las variables aceleración y tiempo (Shojaati, 2003). Valores HIC  $\leq 325$  (Kuppa, 2004), siendo HIC = 325 la mitad del valor máximo establecido por la Euro NCAP (*European New Car Assessment Programme*) para impactos laterales, se asumen como aceptables. Fijando HIC  $\leq 325$ , se ha demostrado que el riesgo de padecer lesiones de tipo AIS =2 es menor del 10 %. Otro valor de referencia es el que recoge la NCHRP350 (1993), en la cual se postula que para valores de HIC = 1000 la probabilidad que los ocupantes padezcan lesiones severas es elevada.

Anghileri et al. (2005) afirman que no hay ningún tipo de correlación entre los índices ASI e HIC. Además concluyen que para valores de ASI por debajo de 1,6 las lesiones provocadas a los ocupantes son insignificantes.

En cambio, Shojaati (2003) determina que entre los índices ASI e HIC sí que existe una correlación para valores de ASI  $> 1,2$ , el índice HIC crece exponencialmente. De acuerdo con la escala abreviada de lesión (*Abbreviated Injury Scale, AIS*) (ver Tabla 2.4), el valor de ASI = 1,2 y de HIC = 200 se asocian a una AIS = 3. La escala de AIS describe las lesiones de la cabeza y el cuello de los ocupantes del vehículo. Las categorías de la severidad de lesión son divididas en 6 niveles numerados del 1 al 6.

AIS	Categoría	Lesiones
1	menor	Dolor de cabeza, vértigo, pérdida leve de la conciencia. Lesiones cervicales leves, latigazo cervical. Abrasión y contusiones.
2	moderado	Conmoción cerebral con o sin fractura de cráneo, con menos de 15 minutos inconsciente. Lesiones en la córnea, desprendimiento de retina. Fractura en la cara o la nariz sin desplazamiento.
3	serio	Conmoción cerebral con o sin fractura de cráneo, con más de 15 minutos inconsciente, sin daños neurológicos graves. Pérdida de la visión. Fractura de hueso con implicaciones antrales o orbitales, fractura cervical sin daño de la médula espinal.
4	severo	Fractura de cráneo cerrado y desplazado con daño neurológico grave.
5	crítico	Conmoción cerebral con o sin fractura cráneo con más de 12 horas inconsciente con hemorragia y daños neurológicos críticos.
6	La supervivencia no es segura	Daño parcial o total del tronco encefálico. Fractura parte cervical con lesiones de la médula espinal. Muerte

Tabla 2.4. Escala abreviada de lesión, AIS. (Fuente: Shojaati, 2003)

En la citada tabla, se observa que a medida que se va aumentando el nivel de AIS, se incrementa la severidad de las lesiones. Se debe tener en cuenta que la gravedad de las lesiones de cada nivel no se eleva linealmente; sino que los daños aumentan exponencialmente. A partir de un AIS = 3, la gravedad de las lesiones se eleva notablemente.

Sturt y Fell (2009) compararon el índice HIC con los índices ASI y THIV concluyendo que se obtenían resultados aceptables de HIC con  $ASI \leq 1,8$  y  $THIV \leq 33$  Km/h.

Gabauer et al. (2005) analizaron la correlación de daños de los índice ASI y ORA (*Occupant Ridedown Acceleration*, desaceleración máxima del ocupante de la norma NCHRP 350) respecto a otros parámetros específicos asociados a las lesiones del ocupante. Se estudiaron el índice HIC, la aceleración y deflexión máxima en el tórax y la fuerza máxima de impacto en el fémur. De los resultados, se concluyó que existen correlaciones elevadas entre los índices HIC y ORA así como entre el índice ASI y la aceleración máxima en el tórax.

En el estudio llevado a cabo por Gabauer et al. (2008), se comparan las mediciones de los índices OIV (homólogo al índice THIV), ASI y Delta-V (medición de la máxima desaceleración) en relación a los daños causados a los ocupantes del vehículo. En este estudio se concluye que el índice ASI y el índice Delta-V pueden ser parámetros predictores de los daños de los ocupantes del vehículo; sin embargo, el último presenta una mayor facilidad y rapidez de obtención.

Para finalizar este apartado en la Figura 2.3 se presenta un esquema resumen de la representatividad de lesiones según los índices ASI y THIV. En ella, se observa que existe un valor límite de discusión de daños entre las clases B y C. Este límite que dicta la norma EN 1317 (2010)

no es un valor diferencial en el daño causado. Prueba de ello, son los diferentes estudios presentados anteriormente donde se determina que los valores límites de ASI con daños aceptables se sitúan entre 1,6 y 1,8. En cambio, las distintas investigaciones analizadas concuerdan con el valor límite de THIV de 33 Km/h para diferenciar entre daños aceptables e inaceptables.

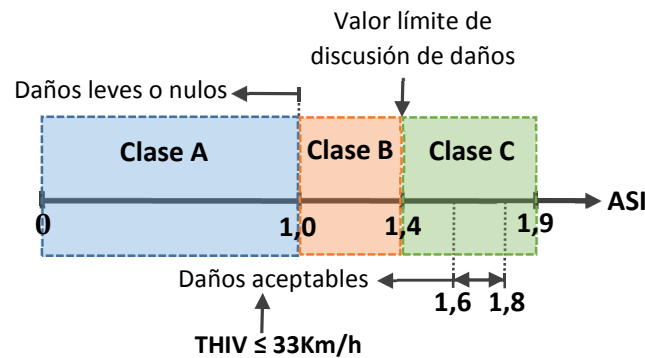


Figura 2.3. Esquema de la representatividad de daños de los índices ASI y THIV.

## 2.5.- PERFIL DE BARRERAS DE HORMIGÓN IN SITU

Las barreras de hormigón son ampliamente utilizadas en carreteras donde el espacio de instalación y el ancho de trabajo son limitadas; tales como medianas estrechas, puentes y carreteras donde se encuentren objetos peligrosos cerca del borde (Grzebieta et al., 2005) y en zonas con una alta intensidad de tráfico (Albuquerque, 2011). Sin embargo, la alta rigidez de estas barreras provoca un mayor riesgo de producir lesiones graves a los ocupantes del vehículo en caso de impacto. Por tanto, la única manera de poder minorar la severidad de impacto es diseñar una forma de perfil más idónea. En los años 40 y 50 del siglo pasado se empezó a incrementar el número de coches en carreteras desarrollándose desde entonces una forma de perfil más segura (Albuquerque, 2011).

En la Figura 2.4 se presentan los principales perfiles de hormigón que han surgido. Los perfiles referentes al 1º perfil de hormigón, New Jersey, General Motors, perfil F y pendiente única (perfiles Texas y California) se diseñaron en Estados Unidos; mientras que el perfil Concrete Step Barrier (CSB) se originó en Europa.

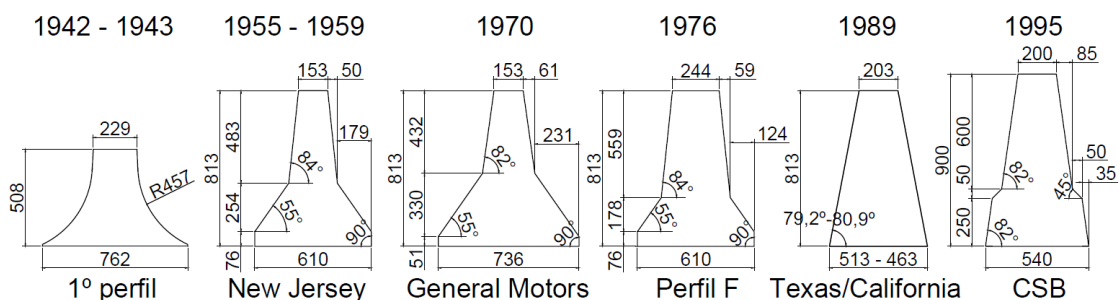


Figura 2.4. Evolución histórica de los principales perfiles de hormigón (Cotas en mm). (Fuente: varias)



Los perfiles New Jersey y F son los más utilizados en carreteras según Bullard (2006) con un 68 % de las barreras de hormigón instaladas en USA. Mientras que en Europa, con datos del año 2000, también se utilizan de manera mayoritaria los perfiles New Jersey y F (FEMA, 2000).

Las primeras barreras de hormigón surgieron entre los años 1942 y 1943 en Louisiana (USA) y en California (1946) (Calloway, 1993). La forma de estas primeras barreras era parabólica con una altura de unos 57 cm (22,5 in) (Lokken, 1974). A principios de los años 50, a medida que el volumen de tráfico y las velocidades de los vehículos se hacían más elevados, se incrementó la necesidad de instalar barreras de hormigón para contener impactos o desvíos de los vehículos (Grzebieta et al., 2005). En 1955 apareció el primer perfil New Jersey en New Jersey diseñada por General Motors, la forma del perfil fue perfeccionándose hasta concluir con el perfil New Jersey definitivo en 1959. La forma inicial del perfil New Jersey se fue modelando en base al estudio que realizó Beaton (1956) realizando 5 ensayos de impacto real y la experiencia de los accidentes producidos en carreteras entre los años 1955 y 1959 (Ray y McGinnis, 1997).

En la década de los años 60 el perfil New Jersey se fue generalizando su uso por todo los Estados Unidos. Paralelamente en Europa se desarrollaron varios tipos de perfiles de hormigón como la alemana DAV, la Trief belga, la francesa Sabla, las italianas y Vianini (Michie, 1971). Sin embargo, la mayoría de estas barreras de hormigón no fueron aptas después de realizar varias pruebas de impacto y la experiencia de los accidentes producidos en carreteras.

Con la finalidad de mejorar las prestaciones del perfil New Jersey, en 1970 se diseñó el perfil General Motors (Jiang et al., 2004). Pronto se vió que el perfil General Motors tenía un comportamiento inaceptable con un alto riesgo de vuelco (Michie, 1971; Ray y McGinnis, 1997; McDevitt, 2000), por lo que se desestimó su uso.

Más tarde, en 1976 se elaboró un estudio paramétrico (variando sistemáticamente los parámetros geométricos) de diversas configuraciones del perfil que fueron etiquetados de la A a la F. El perfil F fue el que mostró un mejor comportamiento frente a las demás propuestas y del propio perfil New Jersey en base los resultados de simulaciones por ordenador y que fueron confirmados por una serie de pruebas de choque a gran escala (Mc Devitt, 2000). Según Jiang et al. (2004) y Clay et al. (2005) el perfil F obtiene mejores resultados que el perfil New Jersey para impactos con vehículos ligeros minorando el riesgo de vuelco (Brondstad et al., 1976).

El perfil de pendiente única se elaboró en 1989 con el objetivo de reducir aún más la posibilidad de vuelco del vehículo (Ray y McGinnis, 1997). Además este perfil tiene la ventaja de permitir recrecidos del pavimento sin afectar al comportamiento del vehículo en el choque (Jewell et al., 1997). La inclinación de 79,2º (perfil Texas) es óptima en base a los estudios de Beason et al. (1989 y 1991). Pero en base a la experiencia, Jewell et al. (1997) proponen un ángulo de 80,9º para reducir la elevación del vehículo sobre la barrera (perfil California).

Con la experiencia internacional de la prevalencia del perfil New Jersey a producir el vuelco de un vehículo a altas velocidades, la administración de carreteras holandesa (Rijkswaterstaat) realizó a principios de los años 90 la búsqueda de una nueva forma de perfil.

En 1995 se diseñó el perfil inglés Concrete Step Barrier (CSB) (GroBe et al, 2004) como consecuencia de la combinación de las formas de los perfiles New Jersey y pendiente única. De esta manera el perfil inglés consigue reducir la posibilidad de vuelco, los daños del vehículo y los daños de los ocupantes (EUPAVE, 2012).

Para finalizar, un perfil que también es utilizado pero no se ha incluido en la Figura 2.3 es el perfil vertical, que se caracteriza por no tener ningún plano inclinado siendo simplemente un muro vertical. El estudio realizado por Albuquerque (2011) determina que el perfil vertical tiene un comportamiento más seguro que el perfil New Jersey. En Australia (AS/NZS 3845) se recomiendan dos tipos de perfiles para la seguridad vial, uno de ellos es el propio perfil vertical (VCB); el otro perfil recomendado es el perfil F (Jiang et al., 2004).

## 2.6.- MODO DE DISEÑO DE UNA BARRERA DE HORMIGÓN IN SITU

Para comprobar si una nueva forma de perfil de barrera es apta para su instalación en carreteras, se requiere realizar los correspondientes ensayos de impacto que dicte la normativa vigente (norma EN 1317). El empleo de estos ensayos de impacto a escala real resultan caros y poco apropiados para un diseño de varias iteraciones modelando según la forma del perfil. Las principales opciones para realizar un análisis iterativo complementarias a los ensayos de impacto real son: los modelos de simulación y los ensayos de impacto a escala reducida (Amato et al., 2013). Otras alternativas menos usadas, pero que pueden ayudar a diseñar una barrera son el empleo de modelos matemáticos simplificados y el análisis estadístico de accidentalidad o de otros ensayos de impacto.

En la norma NCHRP 350 describe hasta un total de 4 técnicas para el desarrollo de un diseño de un sistema de contención: métodos de diseño estructural, ensayos estáticos, ensayos de simulación por ordenador y ensayos dinámicos de laboratorio. De estos últimos se disgregan en ensayos: del péndulo gravitatorio, *drop mass*, modelos a escala reducida, vehículo *boggie* y ensayos de impacto a escala real. En la tabla A.1.6 presente en el Anejo 1 se muestran las ventajas e inconvenientes de cada una de las técnicas. Solamente los ensayos de simulación y los ensayos de impacto a escala real y reducida permiten predecir cada uno de los requerimientos que dicta la norma. Las demás técnicas sólo permiten evaluar la resistencia estructural del sistema de contención.

### 2.6.1- Modelos de simulación

Los modelos de simulación son programas por ordenador que reproducen el ensayo de impacto real mediante análisis numéricos (Jiang et al., 2004). Este tipo de modelos se empezaron usar a partir de los años 1960s. Según Khalil y Du Bois (2004) existen 3 tipos de modelos para simular el impacto de un vehículo contra una barrera: los modelos de parámetros concentrados (*Lumped Mass Spring, LMS*), los modelos híbridos y los modelos de elementos finitos (*Finite*

*Element, FE*). En la Figura 2.5 se muestra el coche modelado para el impacto en la parte frontal en los 3 tipos de modelos mencionados.

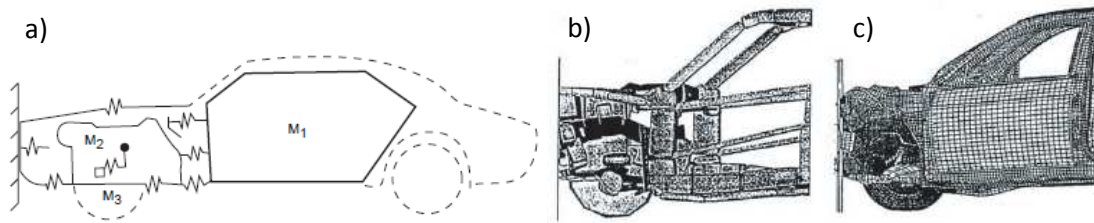


Figura 2.5. Coche modelado en LMS (a), híbrido (b) y FE (c).

Los modelos de parámetros concentrados (ejemplo, Figura 2.5.a) fueron introducidos a principios de 1970s. Este método se basa en la discretización de las partes estructurales del vehículo que participan en el choque en forma de muelles con una cierta rigidez seguidos de la masa asignada del propio vehículo. Ejemplo de ello es el modelo de Kamal (1970) y las posteriores versiones del modelo (Magee, 1988; Lim y Paluszny, 1988; Green, 1977). Este modelo goza de una gran simplicidad pero tiene como principales inconvenientes de que actúa en un sola dimensión y es necesario determinar con cierta precisión las distintas rigideces de los resortes implementados en el vehículo modelo (Mahmood y Fileta, 2004).

En base a las limitaciones del método de parámetros concentrados se combinó este modelo con una simplificación del modelo de elementos finitos llamándolos modelos híbridos (ejemplo, Figura 2.5.b). De este modo, se introducen diferentes tipos de elementos como bigas o superficies al modelo LMS, donde se combina la simplicidad del modelo LMS y la flexibilidad del modelo de elementos finitos. McIvor (1974) fue el primero en diseñar un modelo híbrido, otros estudios le siguieron como el de Liaw (1990) que simuló el impacto de un vehículo contra una barrera rígida.

El método de elementos finitos fue al principio desarrollado por Richard Courant en 1943, y más tarde fue publicado un documento con una definición más amplia del análisis numérico en 1956 por M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, y L. J. Topp. En los años 1960s y 1970s se fue incrementando su uso con el desarrollo de creciente de la capacidad computacional de los ordenadores. Pero no fue hasta medianos los 1980s donde se generalizó su uso, apareciendo los modelos de elementos finitos no lineales.

El método de elementos finitos es un método numérico de aproximación de un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto (ejemplo, Figura 2.5.c); esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo de cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos (Frías, 2004).

El empleo del método de elementos finitos son una efectiva herramienta para el diseño de una barrera, prueba de ello son los estudios realizados por (Atahan, 2006; Bateman et al., 2001; Belingardi et al., 2003; Borovinsek et al., 2007; Emori, 1973; Jiang et al., 2003; Kammel, 2007). Pero se debe tener en cuenta que no siempre son apropiados si nos dispone de información suficiente de los materiales y estructuras no estándares; y del coste computacional que se requiera (Amato et al, 2013).

Desde 1960s se han desarrollado varios programas de simulación numérica aptas para simular ensayos de impacto como el HVOSM (Segal, 1976), el Barrier VII (Powell, 1973), el GUARD (Welch y Pang, 1984), el DYNA3D (Whirley y Englemann, 1993) y el MADYMO (1999) (Jiang et al., 2004). Mak y Sicking (1990) usaron el HVOSM para examinar las colisiones de vehículos contra barreras de hormigón. Beason (1989) con el mismo programa (HVOSM) desarrolló la barrera de hormigón de pendiente única.

Desde los 1990s, el DYNA3D (o su versión comercial LS-DYNA (Ray et al., 2007), programa de elementos finitos no lineal, y el MADYMO, programa de dinámica multi-cuerpo, han ido gradualmente reemplazando los otros programas y se han ido extendiendo su uso en la investigación y diseño de sistemas de contención y barreras de seguridad en carreteras (Ray, 1997; Troutbeck et al., 2001). Prueba de ello, en la Circular (AC) 20-146 del Departamento de Transporte de Estados Unidos permite el uso de los programas LSDYNA, MADYMO y MCS/DYTRAN como códigos aceptados para simulación.

El programa LSDYNA se ha convertido en una importante herramienta de diseño y evaluación en las industrias automovilística y aeroespacial. En la investigación realizada por Ray et al. (2008) se muestra la evolución que ha seguido el programa simulando choques en 3 dimensiones con comportamientos de los materiales no lineales y elastoplásticos con grandes deformaciones. Este modelo ha sido desarrollado por la *The National Crash Analysis Center* (NCAC) de la universidad de *George Washington* junto con la FHWA y la NHTSA del Departamento de Transporte de los Estados Unidos (US DOT).

Dentro del mismo programa, dispone de una carta de materiales caracterizados con los valores estándares de acuerdo con el material empleado. Para el material hormigón el programa dispone de varios tipos de modelos que dependen de la teoría del modo de fallo usado. En el estudio de Yonten et al. (2005) presenta 4 modelos de hormigón (modelos 16, 25, 72 y 78) donde evalúa cuál es el comportamiento de cada uno ante un eventual choque de un vehículo. En el 2007 la FHWA publicó el modelo 159 (Murray et al., 2007), donde presenta el modelo de hormigón propuesto y varios ejemplos de ensayos de simulación junto con ensayos de reales. Uno de los ejemplos es un ensayo de carga estática simulado y real con una barrera de hormigón armado. En lo que se refiere al vehículo, la NCAC dispone en abierto en su página web de varios modelos de vehículos según el tipo y marca (Ray et al., 2008). De modo análogo también pone a disposición de barreras modeladas ya sean metálicas o de hormigón prefabricado. Tanto, los materiales como los modelos de vehículos se pueden modelar y modificar por parte del usuario.

El uso de un programa de simulación requiere de algún modo la verificación de que los resultados son lo suficientemente precisos. Para ello Ray et al. (2008) realizaron un informe de la NCHRP sobre los procesos recomendados para verificar y validar un modelo de simulación por ordenador usado para aplicaciones de seguridad en carreteras. En él, se muestran las metodologías usadas por otros autores para verificar un modelo y la propuesta por el propio grupo investigador.

Ray et al. (2008) proponen comparar los resultados de ambos procesos en base a la tabla de resultados de un ensayo de impacto propuesta por la norma NCHRP 350 (tabla 5.1 de la misma norma NCHRP 350 actualizada en 2011 con el nombre de MASH). Esta tabla se puede ver en el Anejo 1 de la presente Tesis Doctoral. La comparación entre los resultados real y simulado puede ser cualitativo o cuantitativo según el parámetro considerado. Para los parámetros medidos estrictamente numéricos, como la medición de aceleraciones, ángulos de rotación y deflexión dinámica; Ferdous et al. (2011) tienen en cuenta que los resultados de simulación no deben exceder en un 20 % del valor real (Ray et al., 2009).

### 2.6.2- Ensayos de impacto a escala reducida

Los ensayos de impacto a escala reducida son ensayos que reproducen a un tamaño menor al real con el objetivo de reducir costes frente a los de escala real, ya que resultan muy caros. Para ello, es necesario escalar de manera adecuada el vehículo y la barrera; y predecir la física del impacto real. Reproducir el fenómeno del impacto real a escala no es una tarea sencilla (Amato et al., 2013).

La teoría general que se establece para este tipo de ensayos es el teorema  $\pi$  de Buckingham (Buckingham, 1914; 1915). En esta clase choques Emori et al. (1973) investigaron los impactos de vehículos contra postes. Holmes y Sliter (1974) hicieron un análisis preciso del prototipo de vehículo escalado (relación 1:4) usando los mismos materiales que el vehículo real y reproduciendo el mismo patrón de fallo del material cuando el vehículo impacta. Amato et al. (2013) realizaron el ensayo escalado en base a las leyes físicas de mecánica (utilizaron la 2ª Ley de Newton y la conservación de la energía) que gobiernan en estos procesos de impacto.

### 2.6.3- Modelos matemáticos

Otro modo de poder predecir cuál será el comportamiento del vehículo es a través de modelos matemáticos simplificados con el objetivo de reducir el coste computacional. Un ejemplo de ello es el algoritmo matemático basado en el algoritmo de Levenberg - Marquardt planteado por Pawlus et al. (2012). Este algoritmo se basa en las ecuaciones físicas que se rigen a la 2ª Ley de Newton, al balance de energía en el impacto y el modelo viscoelástico de Maxwell. En ellas, se realizan algunas simplificaciones de cálculo como suponer que el vehículo es un sólido rígido y que la deformación de la barrera es despreciable. El modelo planteado muestra una predicción acurada de la trayectoria ( $R^2 \approx 1,00$ ) del vehículo durante el impacto y también de su velocidad ( $R^2 \approx 0,99$ ) en el tiempo. Con menor precisión que las anteriores, también predice

la desaceleración ( $R^2 \approx 0,4$ ) en el tiempo que transcurre el impacto. Es en esta línea, donde el mismo estudio propone que el modelo presentado puede servir como predictor del índice ASI teniendo en cuenta del margen error que pueda cometerse.

Para el diseño de una nueva barrera es necesario saber cuáles son las variables condicionantes para determinar si la barrera es válida o no. En este sentido, Buyak et al. (2008) consideran que las variables a tener en cuenta son las desaceleraciones máximas en X e Y ( $a_x, a_y$ ), la velocidad máxima de impacto de la cabeza en el interior del vehículo en dirección X e Y ( $v_x, v_y$ ), la deformación de la barrera y la rotación del vehículo alrededor del eje X para evaluar el vuelco ( $\varphi_x$ ). Estas variables multiplicadas por un valor peso se relacionan con un algoritmo. El objetivo es encontrar la barrera que en el ensayo minimice el algoritmo planteado. Además estas variables planteadas tienen un valor máximo restringido supeditadas según el valor que limite la norma en este caso queda determinada por la norma NCHRP 350 ( $a_x, a_y \leq 15G, v_x, v_y \leq 9m/s, \varphi_x \leq 15^\circ$ ); si al caso alguna variable lo supera, la barrera no es apta.

#### 2.6.4- Datos estadísticos

Desde la instalación de las primeras barreras de hormigón en los años 50, la experiencia y la recopilación de datos estadísticos han permitido determinar si el comportamiento de un determinado tipo de barrera es el idóneo o no. Aunque no es un método útil para diseñar una nueva barrera, sí que puede incidir cuál es la clase de barrera de seguridad actual que tiene mejores resultados en caso de accidente.

Según Albuquerque (2011), el modo más común para relacionar varias variables es el análisis por regresión, usando por ejemplo el método de mínimos cuadrados. Un paso más en el análisis de este tipo de datos es el uso de modelos lineales generalizados (por ejemplo modelos probit, logit o log-lineales) para categorizar mejor la serie de accidentes a analizar. En este campo, estudios como los de Duncan et al. (1998), Lui et al. (1988), Abdel et al. (1998), Jones et al. (2003) y Albuquerque y Sicking (2013), utilizan estos modelos para el estudio en seguridad en carreteras.

El rango de variables a analizar puede ser muy amplio, prueba de ello es el análisis de Albuquerque (2011), donde analiza los accidentes producidos entre 1998 y 2008 en el estado Iowa. En este estudio se compara los resultados obtenidos entre los perfiles vertical y New Jersey según el año, el tipo de vehículo, la velocidad de impacto, la superficie de la carretera, las condiciones ambientales, la época del año, el año de construcción de la vía o del puente, las condiciones geométricas de la vía, el tipo de conductor y el tipo de colisión.

Otra fuente muy útil para el análisis estadístico de barreras son los resultados obtenidos de los ensayos de impacto normalizados. Ya sean ensayos reales o simulados pueden permitir ver cuál es el comportamiento o la tendencia de las variables a estudiar. Prueba de ello son los resultados de Naing et al. (2008) que relacionan el tipo de ensayos de impacto según la deformación permanente de la barrera y el ASI.

En esta misma dirección, Bonin et al. (2003) realiza un análisis exhaustivo de ensayos TB11 según la deformación dinámica y el ASI obtenido de distintas barreras de seguridad. Shojaati (1999) en base a ensayos tipo TB11 comparó los resultados obtenidos según los índices ASI y THIV, las deformaciones y longitudes de rozamiento sobre las barreras de seguridad.

## 2.7.- METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN Y DOSIFICACIÓN

Para la construcción de una barrera de hormigón in situ se requiere de una metodología y dosificación del hormigón específicas para una correcta puesta en obra. A continuación se presenta el proceso de fabricación actual, las características y dosificación de este tipo de hormigones y la incorporación de otros materiales para pueden mejorar las prestaciones de la barrera.

### 2.7.1- Proceso de fabricación actual

En base a la experiencia de las empresas constructoras del proyecto que forma parte esta tesis (GIVASA, EIFFAGE y Servià Cantó) y el trabajo realizado por la Universidad Politécnica de Catalunya (García, 2004; Casas, 2009) en la elaboración de este tipo de obras; se presenta a continuación el modo de fabricación actual de las barreras de hormigón in situ.

El proceso de fabricación de esta clase de barreras se realiza mediante una máquina de encofrado deslizante. En esta máquina se acopla el molde adecuado al tipo de perfil que se quiera construir. Previamente a la extrusión del hormigón por el molde, la base donde se va a construir la barrera debe estar sobre una capa estabilizada; ya sea una capa de hormigón magro, de asfalto o de zahorra compactada. A continuación se extiende el armado en sentido longitudinal a la barrera a construir (2 varillas de acero de límite elástico superior a 400 N/mm<sup>2</sup> y de 12 mm de diámetro) y se empalman con soldadura solapando los extremos 10 cm. Acto seguido, se procede a la nivelación de la máquina de extrusión a punto para ejecutar la obra.

Antes de verter el hormigón sobre la máquina, se colocan los extremos de las varillas de acero por los agujeros dejados en el molde. El proceso de extrusión empieza con el vertido del hormigón procedente del camión cuba a la tolva de recepción de la máquina (ver Figura 2.6.a).



Figura 2.6. Esquema máquina deslizadora (a) (TEMAC, 2009) y construcción de una barrera de hormigón in situ (b) i (c) (Fuente: Servià Cantó, 2013).

El hormigón es subido por el tornillo sinfín o por cinta transportadora de la máquina y lo vierte en la tolva de vibrado y del molde. La extrusión del hormigón a través del molde es un trabajo en movimiento continuo donde la velocidad de avance diario se sitúa entre 150 – 300 m/día (Servià Cantó). Otras fuentes como la asociación europea de pavimentos de hormigón (2013), la EUPAVE, la sitúan entre 400 – 600 m/día e incluso la federación belga de la industria del cemento (2014), la FEBELCEM, la elevan entre 400 – 800 m/día.

Una vez se ha extrusionado el hormigón por el molde se realizan tareas de reparo por si ha surgido alguna anomalía en su construcción ya sea algún hueco o cavidad. Después de reparar los posibles defectos surgidos, se aplica una capa de líquido impermeabilizante mediante un dispersor para un adecuado curado del hormigón.

Opcionalmente una vez construida la barrera aún con el hormigón en estado fresco, diferentes fuentes recomiendan la realización de **pre-cortes** para inducir la aparición de fisuras de retracción del hormigón. Por Britpave (2004), los pre-cortes se deben realizar cada 3 m con una profundidad de 40 mm con un ancho de 3 mm. En cambio por EUPAVE (2012) o por la FEBELCEM (2013), los pre-cortes se deben espaciarse entre una distancia de 4 y 6 m, con una profundidad de 3 cm aproximadamente; y realizarse entre 6 y 24 horas después de construir la barrera dependiendo de las condiciones climáticas.

### 2.7.2- Características del hormigón deslizado

El hormigón deslizado utilizado para la fabricación de las barreras de contención realizadas in situ se caracteriza por su singularidad de la puesta en obra que lo convierte en un hormigón no convencional. Hay que dosificar un hormigón capaz de llegar a la obra en un estado que, por un lado, permita discurrir por la maquinaria propia de esta tipología y que, por el otro, a la salida del molde, tras el extrusionado, el hormigón se auto soporte, es decir, sea capaz de mantener la forma sin desmoronarse. (Casas, 2009)

Por tanto, es necesario que el hormigón deslizado tenga una buena trabajabilidad para moldearse al molde del perfil de barrera. Para ello, la cantidad de finos y de aditivo plastificante juegan un papel clave. También es necesario que este tipo de hormigones tengan una consistencia seca o muy seca para que se mantenga la forma del perfil una vez se ha extrusionado el hormigón.

El compromiso adecuado entre trabajabilidad y consistencia se debe añadir el vibrado del hormigón en la puesta en obra. Ésta pone en movimiento a las partículas en el hormigón recién mezclado, reduciendo la fricción entre ellas y dándole a la mezcla una mayor fluidez para su extrusión por el molde. Una mayor cantidad de finos de la mezcla permite obtener un acabado liso y uniforme. Sin embargo cabe tener en cuenta que un exceso de vibración puede segregar la mezcla y un escaso nivel de vibrado puede dejar huecos (ver Figura 2.7).



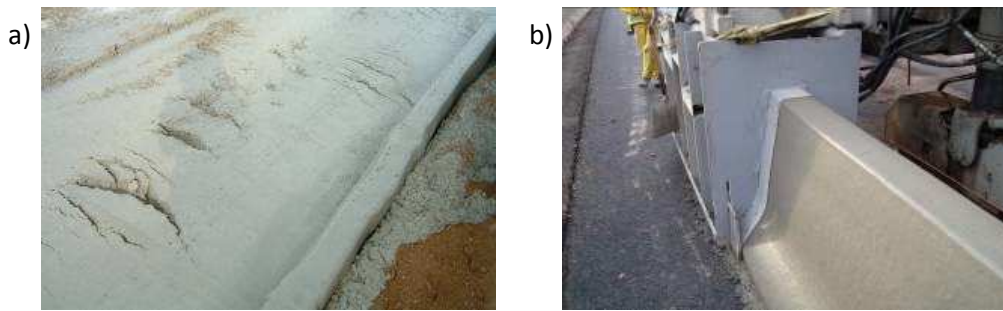


Figura 2.7. Aspecto de escaso (a) y buen vibrado (b). (Fuente: Casas, 2009)

La ejecución *in situ* de este tipo de elementos de hormigón de grandes dimensiones (mayores del orden de 5 m) en una o dos direcciones en el plano, presentan en general problemas de fisuración. Para barreras de hormigón *in situ*, las fisuras aparecen de forma sistemática, con una frecuencia entorno de 4 a 6 metros. Estos problemas no son significativos a nivel estructural de la barrera pero sí a nivel estético y funcional. La existencia de fisuras produce discontinuidades en el elemento lineal haciendo que éste no se comporte como un cuerpo monolítico y transmitiendo al usuario una imagen antiestética y descuidada.

Debido a la importancia del problema de la fisuración del hormigón, se han realizado numerosos estudios que analizan la naturaleza de la mezcla. Entre ellos destaca la Circular E-C107 (2006) de la *Transport Research Board* de Estados Unidos donde estudia las causas del agrietamiento del hormigón, el modo de cómo se producen y las maneras de reducirla. Entre las principales causas son: el asentamiento en estado fresco del hormigón, la retracción en estado fresco y endurecido del hormigón y la contracción por diferencia de temperatura.

El asentamiento del hormigón ha sido estudiado durante varias décadas, entre los más destacados es el trabajo realizado por Powers (1968) en el que se mide el grado de asentamiento relacionando con la relación agua/cemento y la consistencia del hormigón, además de estudiar el diferencial de asentamiento en presencia de bordes o elementos rígidos. Weyer et al. (1982) estudió el asentamiento del hormigón en relación al contenido y espaciamiento de barras de acero. Qi et al. (2003 y 2005) encontraron que la adición de fibras en el hormigón reducían hasta la mitad la capacidad de asentamiento del hormigón fresco al mínimo las tensiones de tracción que las provocan en el propio hormigón. Kayir y Weis (2002) demostraron que el hormigón colocado 40 minutos después de mezclar se reducía un 50 % el asentamiento del hormigón.

La retracción del hormigón en estado fresco depende mucho de las condiciones ambientales (Holt, 2001). Cohen et al. (1989) estudiaron la aparición de tensiones capilares cerca de la superficie y Weiis (1999) de los esfuerzos de retracción presentes. Pease et al. (2004) concluyeron que reduciendo la relación agua/cemento y la cantidad de áridos, la retracción es mayor.

Debido a la complejidad del problema, según Aktan et al. (2004) para prevenir totalmente la aparición de fisuras y grietas en las barreras de hormigón, se recomienda que el

espaciamiento de juntas o pre-cortes en el sentido longitudinal de la barrera sea igual a la altura del perfil.

### 2.7.3- Características exigibles del hormigón deslizado

A continuación se presentan en la Tabla 2.5 las recomendaciones que debe cumplir un hormigón para barreras de seguridad in situ. En ella, se muestran las especificaciones de 3 fuentes distintas procedentes de la empresa constructora británica Britpave, de la asociación europea de pavimentos de hormigón (EUPAVE) y de la federación belga de la industria del cemento (FEBELCEM). Además se muestra en una cuarta columna la confluencia de las 3 fuentes sobre los valores límite exigibles para un hormigón deslizable.

Fuente	Britpave (2004)	EUPAVE (2012)	FEBELCEM (2013)	Confluencia de las 3 fuentes
Clase resistente	C28/C35	C28/C35 o C30/C37	C30/C37	C30/37
Cemento	CEM I 42,5	-	CEM I 42,5 N LA o CEM III/A 42,5 N LA	CEM I 42,5
Contenido mínimo de cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	300	340	375	375
Relación $\leq$ a/c	0,55	0,5	0,5	0,5
Contenido mínimo de aire (%)	3,5 - 5,5	-	3 - 6	3,5 - 5,5
Consistencia (Cono de Abrams, mm)	10 - 30	0 - 30	-	10 - 30
Tamaño máximo del árido (mm)	-	22	32	22

Tabla 2.5. Recomendaciones que debe cumplir un hormigón para barreras de seguridad in situ.

Se observa que la resistencia a compresión exigible a 28 días se sitúa de manera comuna en los 30 MPa. De manera adicional, la FEBELCEM exige una resistencia a compresión igual o superior a los 40 MPa a 90 días. Por tanto, para este tipo de hormigones no se exige una elevada resistencia. Otra opción totalmente diferente es la propuesta por Yan (2009) que analiza el empleo de un tipo de hormigón de ultra alta resistencia (*reactive powder concrete*) con una resistencias a compresión entre 200 y 800 MPa. El análisis deriva que el empleo de este es más eficiente, con mejores prestaciones mecánicas y de durabilidad, y más económico a largo plazo que el hormigón convencional utilizado en barreras de hormigón.

En lo que se refiere al tipo de cemento, todas ellas admiten el tipo CEM I 42,5. Además es conveniente que sea un cemento de rápida resistencia inicial para reducir los tiempos de espera y poner en servicio la vía en el menor tiempo posible. En Bélgica, la FEBELCEM también

propone el uso de cemento con escoria de altos hornos con el objetivo de reducir la cantidad de gases de efecto invernadero (Rens, 3013) con la misma resistencia a compresión exigida que el cemento Portland CEM I.

La consistencia del hormigón fresco requerida es seca, situándose entre 10 y 30 mm. Usualmente, para un esqueleto granular definido, se alcanza jugando con la cantidad de agua y la relación agua/cemento, utilizando la menor cantidad posible de aditivo al tratarse de un componente más caro que el árido. Si bien es una regla general, hay que adaptarla para cada caso específico conociendo las condiciones de contorno de la obra.

En base a la experiencia de las empresas constructoras de barreras de hormigón, a la práctica, aunque la dosificación del hormigón esté preestablecida por el proyecto, las características del hormigón que llega a obra se modifican en función de las necesidades del momento. Si la consistencia no es la correcta, según el criterio del operario, se añade agua al hormigón de forma no reglada y completamente subjetiva, y como consecuencia se modifica todo el trabajo de dosificación previo. Del mismo modo, el nivel de vibración es impreciso y su regulación se hace en base a la experiencia y la pericia del mismo operario. En esta misma línea, si la consistencia del hormigón no es la adecuada, Britpave (2004) propone que se deberá variar la relación a/c.

Un factor sumamente importante en la relación a/c es el uso de aditivos plastificantes en los hormigones deslizados. El objetivo de este tipo aditivos es reducir la cantidad de agua presente en la mezcla, pues el alto contenido de material fino utilizado para lubricar la masa conduce a una gran demanda de agua, que seguramente resulta en una consistencia inadecuada para conseguir una mezcla que no se desmorone.

En referencia al contenido mínimo de aire, se concluye que el valor idóneo se debe situarse entre los 3,5 y los 5,5 %. Para ello, es conveniente incorporar aire a la mezcla mediante el uso de aditivos aireantes que producen un número elevado de finas burbujas de aire que actúan como lubricante del hormigón fresco. De esta forma, da lugar a una mejora de la trabajabilidad y a una disminución de la tendencia del mismo a segregarse y exudar, por lo que resultan muy útiles en el caso de los hormigones deslizados.

Además, otro efecto beneficioso del contenido de aire ocluido en el hormigón son los microporos generados que actúan como alojamientos de agua, cuando ésta se ve forzada a desplazarse por el aumento del volumen al llegar al punto de congelación. De esta manera se reduce la presión y se reduce la posibilidad de rotura por el efecto de las heladas. Las condiciones propuestas por EUPAVE (2012) van dirigidas para hormigones para exteriores con la utilización de sales de deshielo.

Respecto a los áridos, la limitación del tamaño máximo del árido es de 22 mm como valor más restrictivo por parte de Britpave (2004). Además, Britpave determina que el contenido de árido fino será seleccionado en base a las características exigidas para un hormigón deslizado

con un correcto acabado. EUPAVE (2012) recomienda el uso de grava o piedra caliza de machaqueo; y de arena gruesa y fina con el fin de obtener una superficie lisa cerrada.

En base a los estudios realizados por la UPC (García, 2004), los hormigones convencionales, la dosificación del árido se reparte en un 60% para el árido grueso y un 40% para el árido fino. En cambio el hormigón deslizado, la fracción predominante es la fina, con un valor medio del 58%, y la gruesa representa un 42% aproximadamente (ver Figura 2.8).

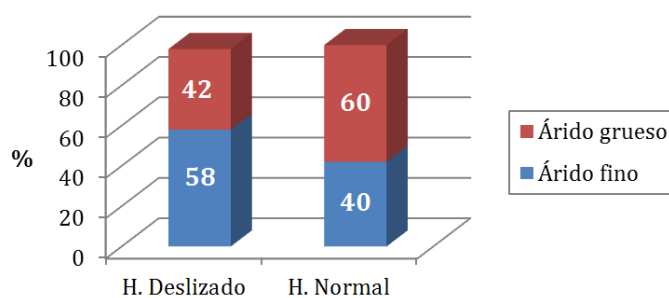


Figura 2.8. Porcentaje de árido fino y árido grueso. (Fuente: García, 2004)

Los finos, con la vibración, se colocan en el paramento exterior formando una película que facilita la extrusión del material. Sin embargo, la elevada cantidad de finos produce, en el hormigón endurecido, problemas graves de fisuración. Por tanto, para optimizar la mezcla a nivel de puesta en obra y en estado endurecido se debe mantener la cantidad de finos pero dosificar con adiciones que reduzcan la fisuración a largo plazo.

#### 2.7.4- Hormigón con fibras

Un material a tener en cuenta para mejorar las prestaciones del hormigón para barreras in situ es el uso de fibras. De acuerdo con la EHE 08, los hormigones reforzados con fibras (HRF), se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas, distribuidas aleatoriamente en su masa (EHE, 2008).

La incorporación de fibras modifica el comportamiento no lineal del hormigón estructural, especialmente en tracción, impidiendo la abertura y propagación de fisuras. Una vez el hormigón ha fisurado, la aportación a tracción debido al efecto puente (*bridging effect*) de las fibras aumenta la resistencia residual del material compuesto. Consecuentemente, y gracias a los mecanismos de pérdida de adherencia (*debonding*) y arrancamiento (*pull-out*) de las fibras, se disipa una mayor energía, lo que conduce a un importante incremento de la tenacidad y un mayor control de la fisuración (Pujadas, 2012). Es decir, las fibras actúan como cosido de las fisuras que pueden producirse, tanto a nivel estructural o como el estético.

La efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de muchos factores, pero especialmente, de la naturaleza de las fibras empleadas. Las fibras pueden ser de acero, poliméricas (plásticas) u otras fibras inorgánicas (EHE 08) (ver ejemplo de tipos en la Figura 2.9).

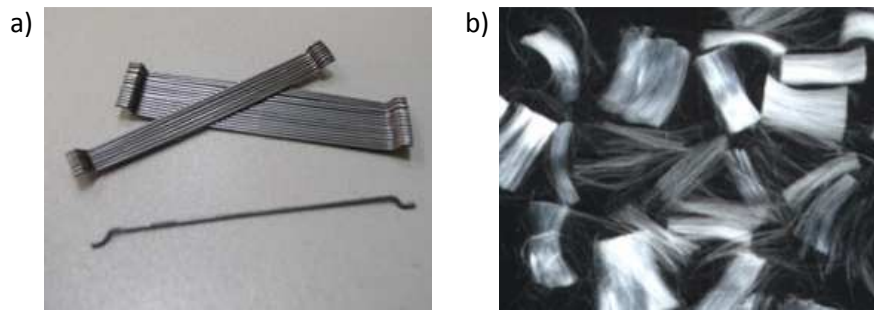


Figura 2.9. Fibras de acero (a), fibras plásticas (b). (Fuente: Casas, 2009)

El comportamiento de las fibras y las propiedades que éstas pueden aportar a la mezcla de hormigón dependen no solamente del volumen aportado sino de las características de las propias fibras. De acuerdo con Naaman (2003), para que una fibra trabaje de forma eficiente, ésta debe presentar las siguientes propiedades: elevada resistencia a tracción, resistencia a la adherencia con la matriz del mismo orden o incluso superior a la resistencia a tracción de dicha matriz, módulo elástico mayor que el correspondiente a la matriz (por lo menos 3 veces mayor) y debe presentar un coeficiente de Poisson y coeficiente de dilatación térmica preferiblemente semejante al de la matriz.

Las fibras de acero son las más utilizadas para conseguir hormigones con mejores resistencias a flexión, a tracción, a impacto y a fatiga; y conseguir un mayor control de fisuras y consecuentemente una mayor durabilidad del hormigón (Blanco, 2008). Este hecho se debe al elevado módulo de elasticidad del acero que es siete veces mayor que el del hormigón, su alto alargamiento de rotura y su buena adherencia con el hormigón. Además, las fibras de acero se mezclan fácilmente con el resto de componentes del hormigón.

La geometría de las fibras es diversa, pudiendo tener sección circular, cuadrada o rectangular. Además, con el fin de mejorar la adherencia con el hormigón, las fibras pueden presentar los extremos conformados, ondulaciones, corrugas, aplastamientos, ganchos, etc.

Respecto a las fibras poliméricas, aunque no son mecánicamente tan eficientes como las fibras de acero, existe una amplia gama de fibras y una gran variedad de geometrías en el mercado. De manera general, las fibras plásticas pueden clasificarse como: micro-fibras (no estructurales) y macro-fibras (estructurales) (Pujadas, 2012).

Las micro-fibras sintéticas, han sido tradicionalmente utilizadas en el hormigón para controlar y reducir la fisuración por retracción plástica (Soroushian *et al.*, 1995 y Naaman *et al.*, 2005) y mejorar el comportamiento frente al fuego (Liu *et al.*, 2008) y, aunque en menor medida, para mejorar la tenacidad y resistencia al impacto (aunque no asumen funciones estructurales).

En los últimos años, sin embargo, los crecientes esfuerzos de la industria se han dirigido al desarrollo de una nueva generación de fibras con finalidad estructural, éstas se conocen como macro-fibras. Si bien las macro-fibras plásticas no se han estudiado en la profundidad con la que se han investigado las fibras de acero, existen en la literatura técnica trabajos e investigaciones

en las que se demuestra que con la adición de macro-fibras plásticas se logra mejorar significativamente la resistencia a flexión, resistencia al impacto y comportamiento a la fatiga (Cengiz y Turanli, 2004 y Buratti *et al.*, 2011). Consecuentemente, el uso de macro-fibras plásticas o sintéticas (*polyolefin based structural fibers*) en la industria del hormigón se ha extendido más allá de un mero control de la fisuración por retracción plástica, para ser utilizado en nuevas aplicaciones con contribución estructural (Soutos *et al.*, 2012; Alani, y Beckett, 2013).

En lo que se refiere estrictamente la aplicación de fibras en barreras de hormigón, gracias el mayor conocimiento actual de las fibras, Britpave (2004) posibilita el uso de fibras de prolipropileno y de otras adiciones que estén permitidas (BS EN 934-2:2001).

### 2.7.5- Dosificación tipo

En base a las características exigible de un hormigón deslizado se debe diseñar la dosificación del hormigón. En este campo, desde la Universidad Politécnica de Catalunya se tiene una experiencia notable sobre este tipo de hormigones desde el 2004 con tramos experimentales de barrera (carretera C-17 Tona (Barcelona)) con la empresa FCC-Servià Cantó. Los trabajos realizados por García (2004) y Casas (2009, 2011), se concluyeron con las siguientes propuestas de dosificación presentadas en la Tabla 2.6. Las dosificaciones presentadas son la de hormigón de referencia (R), con filler (F), con fibras plásticas de polipropileno (FP) y con fibras de acero (FA).

Material	R	F	FP	FA	Material	R	F	FP	FA
Arena 0-6	900 (0-3)	900 (0-3)	900 (0-3)	900 (0-3)	Plastificante (l/m <sup>3</sup> )	2	2	2	2
Grava 6-12	200	200	200	200	Agua (l/m <sup>3</sup> )	114	114	114	114
Grava 12-20	850 (20/25)	850 (20/25)	850 (20/25)	830 (20/25)	Filler (Kg/m <sup>3</sup> )	-	50	-	-
CEM I 42,5 R	350	300	350	350	Fibras (Kg/m <sup>3</sup> )	-	-	0,6	15
Aireante (l/m <sup>3</sup> )	0,75	0,75	0,75	0,75	Cono de Abrams	20	20	-	-

Tabla 2.6. Dosificaciones tipo.

Como se puede ver, las 4 dosificaciones tienen la misma cantidad de áridos, aireante, plastificante y de agua. Lo único en que difieren es en la cantidad de material nuevo para cada dosificación, excepto con el hormigón con filler que tiene una cantidad de cemento inferior, con la intención de reducir la cantidad de cemento pero mantener la cantidad de finos.

Los resultados con estas dosificaciones arrojaron un buen comportamiento durante el deslizado en estado fresco es debido a una importante presencia de finos que permiten dar fluidez al hormigón. La trabajabilidad de la mezcla, con conos de Abrams de 20 mm son los idóneos para este tipo de hormigones. En estado endurecido, se mejoró en la menor presencia de fisuras y grietas, especialmente con las dosificaciones con filler; y con fibras plásticas y de acero.

Para mayor información, en el Anejo 2 se muestra un total de 9 dosificaciones donde se muestra la evolución que ha seguido la composición del hormigón deslizado. Cada una de ellas, se ha ido mejorando sus prestaciones tanto en estado fresco como endurecido.

### 2.7.6- Posibilidad de empleo de materiales reciclados

Una opción interesante desde el punto de vista de sostenibilidad y del medio ambiente es el empleo de materiales procedentes de residuos en el hormigón. En este sentido los esfuerzos para aprovechar este material de desecho se han concentrado en sustituir parte del árido del hormigón. Entre los materiales aprovechados destacan los áridos reciclados procedentes de la construcción y de la demolición y el polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso. En la Figura 2.10 se muestra un ejemplo de cada uno de los dos materiales reciclados listos para su uso.

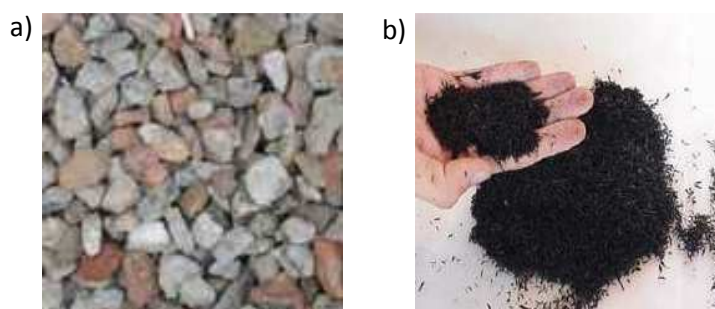


Figura 2.10. Árido reciclado (a) (Mena, 2015), polvo de neumático (b) (propia).

El empleo de materiales reciclados procedentes de la construcción y demolición, la FEBELCEM (2013) propone que es perfectamente posible obtener un hormigón de buena calidad con la sustitución de un 20 % del árido en barreras de hormigón in situ. La propia EHE 08 en el Anejo 15 limita hasta un 20 % la sustitución de la fracción gruesa por árido reciclado. Un paso más es el estudio de Mena (2015), donde demuestra la viabilidad de sustituir el 100 % del árido grueso por árido reciclado mixto para aplicaciones estructurales.

La posibilidad de utilizar gomas trituradas de neumáticos fuera de uso como áridos para hormigones ha sido estudiada numerosas veces como, por ejemplo, en los estudios realizados por Biel y Lee (1994), Huynh y Raghavan (1997), Kathib y Bayomy (1999) y Nehdi y Khan (2001). Los primeros resultados revelaban una disminución considerable en las propiedades mecánicas del material, como la resistencia a la compresión y a la tensión. En pruebas hechas por Biel y Lee

(1994), donde se sustituyó la totalidad del agregado por goma triturada, la resistencia a compresión se redujo en un 90%.

Estudios más recientes lograron estabilizar el efecto de la goma en la mezcla obteniendo resultados favorables en pruebas de compresión y tensión. Khatib y Bayomy (1999) estudiaron el comportamiento de muestras de hormigón con diferentes cantidades de goma triturada. Sus resultados revelan que para obtener resultados similares a los de la mezcla convencional, el contenido óptimo de material reciclado no debe exceder el 20% del volumen total de agregado.

El estudio de Atahan y Sevim (2008) concluyó que la incorporación de goma triturada en barreras de hormigón reduce la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad entorno a un 65 % del hormigón con 100 % de goma respecto al hormigón convencional. En cambio, la sustitución del 100 % del árido por goma triturada consigue un 187 % más de energía de absorción del hormigón convencional. A su vez, en los ensayos dinámicos de impacto mostraron que un incremento en el porcentaje de goma implica una reducción significativa de la deceleración máxima del vehículo y a su vez de la severidad de impacto. El mismo estudio concluye que el porcentaje de sustitución entre el 20 y el 40 % consigue una energías de absorción entre el 46 y el 70 %, con reducciones de la desaceleración pico entre 19 y 27 %; manteniendo una resistencia de compresión entorno a 25 MPa.

Por tanto, una opción a tener en cuenta es emplear goma de neumático reciclado como sustitución de parte del árido para hormigones de barrera de seguridad. El impacto de un vehículo contra una barrera de hormigón provoca fuertes desaceleraciones y grandes daños a los vehículos debido a la gran rigidez de este sistema de contención (Itoh et al., 2007). Una posible opción para disminuir esta rigidez es emplear el uso de goma triturada de neumático reciclado como sustitución del árido del hormigón, tal y como se dedujo del estudio de Topçu y Avcular (1997) para reducir los daños del vehículo y el riesgo de lesión de los ocupantes.

## 2.8.- CÁLCULO ESTRUCTURAL

Uno de los factores más importantes que debe tener una barrera de seguridad es contener el impacto de los vehículos. El objetivo principal del presente cálculo estructural es predecir la resistencia a rotura de una determinada barrera. Para ello, a continuación se presenta el cálculo de la carga de impacto de un vehículo de diferentes normativas, códigos de recomendación y literatura técnica. Después, se muestra el modo más común de cálculo de rotura en barreras de hormigón.

### 2.8.1- Cargas de impacto

Existen distintos enfoques para determinar el valor de diseño de la carga de impacto. En este sentido, los enfoques recogidos en las normas/recomendaciones a nivel nacional y/o internacional plantean valores (magnitudes y direcciones) de diseño o bien expresiones



simplificadas prescritas para evaluarlas. Además, también se ha tenido en cuenta otras propuestas de valores de diseño presentes en la literatura técnica que, en algunos casos, son fruto de la medición directa de la fuerza de impacto en ensayos experimentales.

### **Normativas y guías de diseño**

A nivel nacional, el Ministerio de Fomento tiene articuladas una serie de normativas e instrucciones a seguir para el impacto de vehículos contra diferentes tipos de estructuras. En la Tabla 2.7 se presentan los valores y modos de carga del Código Técnico de Edificación (CTE), de la Instrucción sobre las Acciones a considerar sobre Puentes de carretera (IAP-11) y del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3).

Impacto de vehículo	Carga de impacto	Modo de carga	Fuente
En edificios	50 kN	Superficial: 0,25 x 1,5 m Altura aplicación: 0,6 m	CTE. Documento Básico. SE-AE
Elementos estructurales	500 kN (transversal) 1000 kN (longitudinal del tráfico) No actúan simultáneamente	Superficial: 0,5 x 1,5 m Altura más desfavorable: 0,5 - 1,5m	IAP-11
Sistemas de contención	Fuerza horizontal transversal y un momento en el eje longitudinal, concomitantes  Medidas ensayo de impacto real de acuerdo con la norma UNE EN 1317	Aplicación de la fuerza y el momento en la zona de unión en el sistema de contención y la estructura del puente	IAP-11
Sistemas de contención	Barrera según nivel de contención de la norma UNE EN 1317	-	PG-3. Orden circular 321/95

*Tabla 2.7. Cálculo de la carga de impacto de vehículos en el ámbito nacional.*

De los datos recogidos en la Tabla 2.7 se desprende que existe una gran diferencia del valor y modo de aplicación según la normativa (valores entre 50 kN para choques contra edificios hasta 500 kN en el caso de elementos estructurales pertenecientes a puentes). De manera específica, para impactos de vehículos contra sistemas de contención la IAP-11 y el PG-3 se remiten a que el valor de impacto del vehículo deberá dimensionarse según la norma UNE EN 1317 mediante mediciones experimentales. En el Anejo 3 se desarrollan las formulaciones y criterios recogidos en sendas normas.

En la Tabla 2.8 se recogen las formulaciones, valores y modos de carga de impacto según los dos principales entes en el marco internacional. En el ámbito europeo es el CEN (Comité Europeo de Normalización) que redacta los eurocódigos estructurales con el fin de unificar criterios y normativas de diseño; y en el ámbito americano son la AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) y la FHWA (*U.S. Department of Transportation's*

*Federal Highway Administration*) mediante el programa nacional de investigación en seguridad de carreteras (NCHRP). En esta tabla, se evalúa la magnitud y la posición de la carga según la fuente. En el Anejo 3 se encuentra con más detalle las especificaciones de cada caso y con sus correspondientes apreciaciones de cálculo.

Impacto de vehículos	Carga de impacto	Modo de carga	Fuente
Muros y pretilas de aparcamiento	$* F = 0,5 \cdot M \cdot \frac{v^2}{\delta_c + D_r}$ Valores orientativos: $v = 4,5 \text{ m/s}$ , $\delta_c = 0,1 \text{ m}$ Para $D_r = 0 \text{ m}$ , $F = 150 \text{ kN}$ para $M < 2500 \text{ Kg}$	Lineal en 1,5 m Altura de aplicación es la del parachoques	Eurocódigo 1. Parte 1.1. Acciones Generales. Anexo B (EN 1991-1-1:2002)
Elementos estructurales	500 kN (transversal) 1000 kN (longitudinal)	Puntual Altura de aplicación a 1,25 m del suelo	Eurocódigo 1. Parte 1.7. Acciones Accidentales (EN 1991-1-7:2006)
Elementos estructurales	$* F = v \cdot \sqrt{K \cdot M}$ $K \approx 300 \text{ kN/m}$ (orientativo)	Puntual Altura de aplicación a 1,25 m del suelo	Eurocódigo 1. Parte 1.7. Acciones Accidentales (EN 1991-1-7:2006) Anejo C
Sistemas de contención	Entre 100 y 600 kN (según clase del sistema de contención de acuerdo con la norma EN 1317-2)	Lineal en 0,5 m Altura de aplicación 100 mm por debajo de la coronación	Eurocódigo 1. Parte 2. Acciones de tráfico en puentes (EN 1991-2:2003)
Sistemas de contención	Entre 60 y 780 kN (transversal) Entre 20 y 250 kN (longitudinal) Según nivel contención	Lineal entre 1 y 2,4 m Altura de aplicación entre 0,5 y 1,4 m	<i>AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2012)</i>
Sistemas de contención	$F = \frac{M \cdot (v \cdot \sin \beta_i)^2}{2 \cdot [A \cdot \sin \beta_i + (\cos \beta_i - 1) \cdot B + D_r]}$ $F = M \cdot a_{lat}$	-	<i>NCHRP Report 86 (1970)</i>

\*F = carga de impacto (N), M = masa del vehículo (Kg), v = velocidad del vehículo (m/s),  $\delta_c$  = deformación del vehículo (m),  $D_r$  = deformación remanente de la barrera (m), K = rigidez lineal del vehículo (N/m),  $\beta_i$  = ángulo de impacto ( $^\circ$ ),  $a_{lat}$  = desaceleración de impacto ( $\text{m/s}^2$ ), A = distancia del centro de gravedad del coche al frontal (m), 2B = anchura del vehículo (m).

Tabla 2.8. Cálculo de la carga de impacto de vehículos según distintas normativas.

De la Tabla 2.8 se desprende que los valores de impacto se expresan mediante valores de carga estática equivalente o expresiones simplificadas que involucran las variables determinantes según las características del vehículo y de la barrera. Los valores numéricos de la carga de impacto (sentido transversal) varían entre los 60 y los 780 kN. El modo de aplicación de las cargas puede ser lineal o puntual según la naturaleza de la carga y el nivel o clase de contención. Adicionalmente, en el Anejo 3 se puede ver los valores y modo de carga a dimensionar para cada nivel de contención de la AASHTO LFRD (2012).

Las fórmulas propuestas en los distintos códigos están planteadas para el predimensionamiento, pues algunas de las variables involucradas llevan asociado un alto grado de incertidumbre. En el caso de las fórmulas propuestas por los eurocódigos, se debe estimar cuáles son las deformaciones del vehículo y de la barrera o de la rigidez lineal del vehículo. Cada tipo de barrera y modelo de vehículo tendrán un valor distinto, en el Anejo 3 se muestran los rangos de valores para su dimensionamiento. Para la fórmula de la NCHRP 86, Hirsch (1986) observó que existe un cierto error entre el valor predicho por la fórmula y el real, llegando a ser la carga de impacto un 79% superior al teórico.

### Literatura técnica

En la literatura técnica se proponen principalmente dos métodos básicos para calcular la fuerza de impacto de un vehículo contra una barrera de seguridad. Uno se centra en el uso del balance energético en proceso de choque (Ec. 2.3-5). El otro es el empleo de la 2ª Ley de Newton (Ec. 2.6).

#### **Balance de energía**

$$E_{inicial} = E_{final} \quad [\text{Ec. 2.3}]$$

$$E_{cinética,inicial} = E_{deformación,final} \quad [\text{Ec. 2.4}]$$

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2 = F \cdot \delta_{v+b} \quad [\text{Ec. 2.5}]$$

#### **2ª Ley de Newton**

$$\sum F = M \cdot a = M \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad [\text{Ec. 2.6}]$$

En el método basado en la conservación de la energía se asume que la energía inicial ( $E_{inicial}$ ) es cinética ( $E_{cinética,inicial}$ ) (vehículo con una cierta masa ( $M$ ) y velocidad ( $v$ )) y se convierte toda ella en energía de deformación ( $E_{deformación,final}$ ) (deformación ( $\delta_{v+b}$ ) del vehículo y de la barrera). Esta hipótesis es la empleada en el Eurocódigo1.

En base a este balance existen diferentes variaciones de la formulación para poder garantizar una mayor representatividad. Iqbal (2010) propone la variación de la fórmula del Eurocódigo 1, relacionando con expresiones simplificadas los valores de deformación del vehículo y de la barrera con la velocidad y fuerza de impacto con datos basados de la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA). Harrison (2004) hace el balance energético

teniendo en cuenta que el choque entre vehículo y barrera se asimila a un resorte con un cierto coeficiente elástico. Otros balances energéticos más complejos que tienen en cuenta la energía disipada debido al impacto, son los propuestos por Bonin et al. (2004), Jiang et al. (2002 y 2004).

Bonin et al. (2004) proponen que el trabajo realizado por la fuerza de impacto a causa del desplazamiento es igual a la energía disipada de la barrera. Para ello se emplean coeficientes de rozamiento y ángulos de rotación estimados. Por otra parte, Jiang et al. (2002) desarrollan el balance de energía igualando a la energía cinética inicial por el trabajo realizado por la fuerza de impacto más la energía disipada por el vehículo y la barrera. En cambio, Jiang et al. (2004) plantean una expresión semiempírica de la energía disipada suponiendo que el vehículo se deforma de manera plana ante el impacto. En todos los casos, el rango de errores obtenido en la comparación de los resultados analíticos y los experimentales oscila entre el 1 % y el 60 %.

El otro enfoque consiste en emplear la 2ª Ley de Newton, donde la fuerza de impacto ( $F$ ) es igual a la masa del vehículo ( $M$ ) por la desaceleración producida por el choque ( $a$ ) en un cierto tiempo ( $t$ ). Por tanto, sabiendo la masa del vehículo queda por determinar su desaceleración. Para determinarla, existen dos opciones: (1) expresiones matemáticas o (2) la medición directa en un ensayo de impacto real o simulado.

Un ejemplo del empleo de expresiones matemáticas es la fórmula empleada por la Olson et al., recogida en la *NCHRP Report 86 (1970)* y que relaciona la desaceleración de impacto con la geometría del vehículo y la deformación de la barrera. Para calcular su valor pico, Hirsch (1986) propuso incrementar el valor sugerido por Olson et al., multiplicando por  $\pi/2$ ; sin embargo, para vehículos pesados la precisión de los resultados difieren notablemente de los reales, alcanzando errores de un 79% , del lado de la inseguridad.

Otra vía de cálculo es el planteado por Amato *et al.*, (2012) que proponen calcular la desaceleración pico de impacto relacionando la velocidad, la masa y la rigidez del vehículo con una precisión de 0,5% con el resultado de un sólo ensayo real. Otra opción es la planteada por Pawlus et al. (2012) que reconstruyen el impacto de un vehículo mediante el uso de ecuaciones cinemáticas que conducen a reproducir los desarrollos del desplazamiento, la velocidad y la aceleración del vehículo durante el choque; pudiéndose calcular su desaceleración máxima, aunque su grado de precisión es muy bajo, llegando a ser la mitad del valor pico.

La medición directa de la desaceleración de impacto de un vehículo es la forma más precisa de obtener el valor de fuerza de impacto, ya sea mediante ensayo real o simulado. Existen varios estudios con datos de medición de distintas clases de vehículos y tipos de ensayos que presentan o comparan datos reales con simulados, ejemplo son los resultados y análisis presentados en Sun et al. (2012), Wu et al. (2013), Amato et al. (2012) o Yan (2012).

Respecto a la medición de los ensayos experimentales, en Terry et al. (2006) es interesante ver su recopilación de varios estudios externos donde se calcula la fuerza de impacto mediante la desaceleración media de choque de varios ensayos de impacto del mismo tipo. En el mismo estudio establece que la desaceleración está directamente relacionada con tiempo en

el que se produce la deformación del vehículo. Los picos máximos de desaceleración en el transcurso del choque no son representativos para calcular la fuerza de impacto real, pues suceden en espacios de tiempo muy cortos.

En este sentido, Noel et al. (1981) establece un intervalo de 0,05 s para el cálculo de la fuerza media resultante. En el Anejo 3 se muestran un recopilatorio de diferentes valores de impacto contra barreras de hormigón según el tipo de vehículo y ensayo utilizado de distintas fuentes.

## 2.8.2- Modo de rotura

### Modo de rotura empleado en la actualidad

En la actualidad el modo de fallo aceptado para una barrera de hormigón sometida al impacto de un vehículo se basa en las directrices planteadas por Hirsch (1980) y recopiladas en el manual *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, del 2012. Este cálculo de rotura se basa en el método de las líneas de rotura planteado por Johansen (1962). Este método se basa en encontrar el valor de carga, mediante la suposición de una forma de rotura, que produce el fallo de la estructura. En el Anejo 4 se muestran las bases del método y la formulación utilizada.

En la Figura 2.11 se presenta el patrón de rotura propuesto en la AASHTO LRFD (2012). En ella se observa una rotura con forma triangular tomando dos líneas oblicuas simétricas que parten desde la base de la barrera hacia la coronación de la misma, cuyo centro coincide con el punto medio de la carga lineal uniformemente repartida ( $f_R$ ) en coronación con una determinada longitud de aplicación ( $L_f$ ).

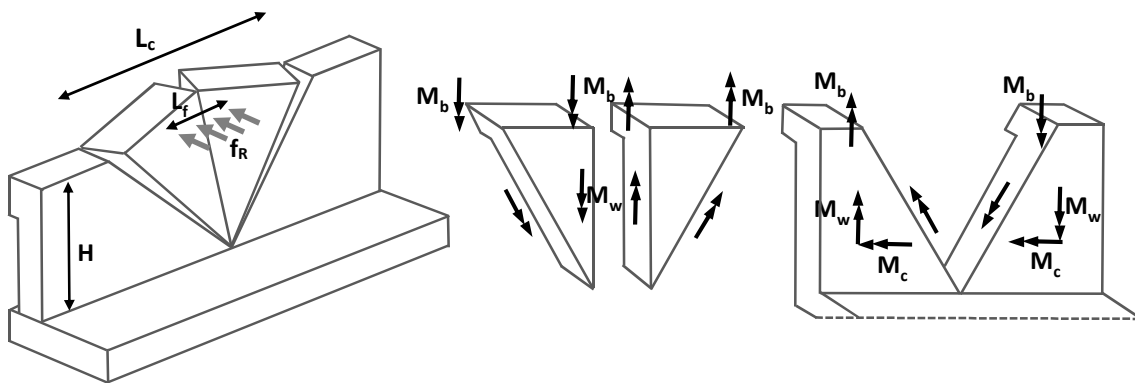


Figura 2.11. Modo de rotura propuesto por la AASHTO LRFD (2012).

$$L_c = \frac{L_f}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_f}{2}\right)^2 + \frac{8 \cdot H \cdot (M_b + M_w)}{M_c}} \quad [\text{Ec 2.7}]$$

$$F_R = \left(\frac{2}{2 \cdot L_c - L_t}\right) \cdot \left(8 \cdot M_b + 8 \cdot M_w + \frac{M_c \cdot L_c^2}{H}\right) \quad [\text{Ec 2.8}]$$

Mediante las ecuaciones 2.7 y 2.8 se determinan los valores de la longitud crítica ( $L_c$ ) y la carga de rotura ( $F_R$ ) de la forma propuesta de fallo empleando el teorema de los trabajos virtuales. En este cálculo, los momentos de las dos líneas de rotura oblicuas se descomponen en dirección horizontal ( $M_c$ ) y vertical ( $M_w$ ) para evaluar la contribución de las armaduras dispuestas en cada dirección. Además, también se tiene en cuenta el momento resistente que pueda ejercer cualquier elemento presente como barandillas de puentes ( $M_b$ ).

### **Limitaciones del patrón propuesto por la AASHTO LRFD**

Los ensayos experimentales permiten ver que el patrón de rotura propuesto por la AASHTO LRFD tiene ciertas limitaciones. En este contexto, Huali Geng et al. (2006) muestra en su estudio que el modo de rotura de la barrera depende principalmente del tipo de unión de la base con el suelo. Cuánto más rígida sea esta unión, mayor parecido tendrá con el modelo estimado de la AASHTO, aunque sin poder representar de manera certera la realidad.

En la investigación realizada por Jeon et al. (2008) se obtienen valores de la carga de rotura inferiores a los preconizados mediante la formulación de la AASHTO. Las dos causas principales se atribuyen a la forma geométrica de barrera y a las limitaciones que lleva asociado el empleo del modelo clásico de líneas de rotura propuesto. Por esta divergencia de resultados, Jeon et al. (2008) proponen una forma de rotura más realista presentada en la Figura 2.12. En la misma, se observa la aplicación de una carga lineal en coronación proponiendo un mecanismo de fallo de forma trapezoidal.

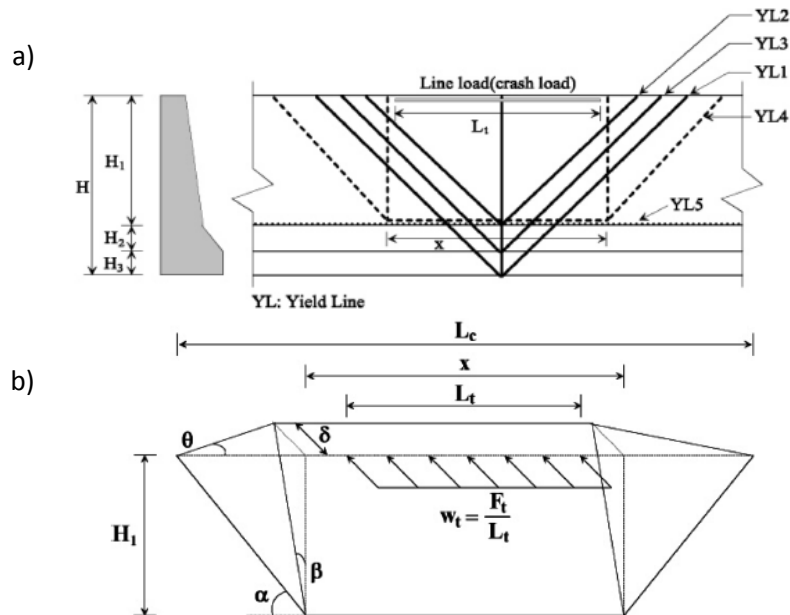


Figura 2.12. Propuestas de líneas de rotura (a), forma trapezoidal YL4 (b). (Fuente: Jeon et al., 2008)

Asimismo, en dicha Figura 2.12.a se puede observar que la forma de rotura se adapta a la forma del perfil de barrera. El mismo estudio concluye que la consideración de la línea de rotura YL4, y el mecanismo trapezoidal (Figura 2.12.b) resultante, conducen a un valor de la carga de rotura inferior al obtenido en el ensayo real con carga estática.

Para barreras de hormigón que presenten discontinuidades en el sentido longitudinal, el modo de rotura difiere según el punto de impacto. En Jeon et al. (2008) se considera este aspecto para el caso de una carga que actúe en la junta, tal y como se muestra en la Figura 2.13.

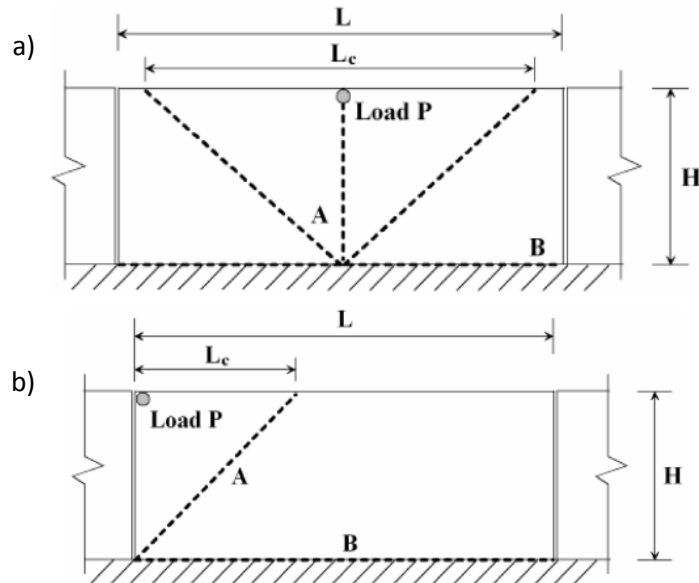


Figura 2.13. Modo de rotura entre juntas (a) y de un extremo (b). (Fuente: Jeon et. al., 2008)

## 2.9.- CONCLUSIONES

A partir de la revisión del presente estado del conocimiento, se destacan las siguientes conclusiones claves para el desarrollo de esta Tesis Doctoral:

- Los principales tipos de barreras de seguridad son las barreras metálicas, las de hormigón prefabricadas y las de hormigón in situ. De ellas, las barreras de hormigón *in situ* destacan por su rápida construcción, mantenimiento nulo y competitividad económica respecto de las demás tipos de barreras.
- Los perfiles de barreras de hormigón existentes corresponden a diseños realizados con más de 20 años de antigüedad, con un único perfil (perfil CSB) con distinción clase B de la norma EN 1317. Por tanto, en esta tesis se plantea diseñar una nueva forma de perfil de barrera que sea de clase A o B.
- De acuerdo con los modos de diseño presentados en este capítulo, en esta investigación se emplearán los dos modos más usuales: ensayos de simulación numérica junto con una secuencia de 11 ensayos de impacto.
- Para el diseño al cálculo estructural se seguirá el método de las líneas de rotura, donde se propondrán formas de rotura más realistas acorde las planteadas por otros autores.

## CAPÍTULO 3

# Aspectos geométricos para el diseño de la barrera

### 3.1.- INTRODUCCIÓN

En el mercado existen una variedad de formas de perfiles de barreras de hormigón in situ, que responden principalmente al nivel de contención y seguridad que ofrece dicho sistema ante el impacto. El uso de cada perfil debe estar de acuerdo a la norma EN 1317 que establece los criterios que deben cumplir para su instalación. Tal como se ha dicho en el capítulo anterior, desde el punto de vista de la seguridad, se establecen unos niveles que se miden a partir de dos parámetros de manera experimental con un ensayo de impacto en unas condiciones de contorno que dictamina la norma. Estos dos parámetros son los índices ASI (*Acceleration Severity Index*) y THIV (*Theoretical Head Impact Velocity*) que, según su valor, se clasifica el sistema de contención en 3 clases: clase A, B y C. A nivel nacional, se impone que la instalación de nuevos sistemas de seguridad en carreteras deben de ser de clase A o B.

De acuerdo con este marco, las barreras de nueva construcción requieren el cumplimiento de la norma utilizando formas de perfil ya patentadas. Por tanto, se plantean dos opciones para la construcción de nuevas barreras de seguridad: utilizar formas de barreras ya existentes o diseñar un nuevo perfil de barrera de hormigón *in situ* cumpliendo con los requisitos pertinentes.

El **objetivo principal** de este capítulo es el diseño de una nueva forma de perfil variando estrictamente sólo los parámetros geométricos de la sección con el cumplimiento de la norma



en materia de seguridad. Para conseguir este hito surgen de forma natural otros objetivos específicos en este capítulo:

- La razón e incidencia de cada uno de los parámetros geométricos considerados en el perfil de diseño.
- Evaluar cuáles son los principales parámetros geométricos del perfil y definir un rango de valores de cada uno.

La **metodología** que se ha seguido para alcanzar los objetivos de este capítulo se estructura en 3 apartados; cada uno de los cuales trata sobre los pasos seguidos en este estudio.

- 1º. Explicar cada uno de los parámetros geométricos del perfil de diseño y cómo interaccionan durante la secuencia de impacto. De este modo, se especifica la función que desempeña cada variable para entender mejor su rol de cara al choque.
- 2º. Analizar los resultados obtenidos con el modelo numérico de cada una de las propuestas de perfiles. En este apartado es donde se desarrolla la metodología expuesta en el esquema de la Figura 1.2. En él se desarrolla un proceso iterativo de prueba y error donde se utilizan los resultados de las diferentes propuestas geométricas y se recoge un proceso de aprendizaje en base a lo anterior. En cada fase de ensayos se deducen unas conclusiones y se procede de nuevo a una nueva serie de perfiles.
- 3º. Finalizar con las conclusiones que deben satisfacer los objetivos planteados de inicio de este capítulo.

### 3.2.- RAZÓN DE SER DE CADA PARÁMETRO GEOMÉTRICO

Las barreras de seguridad existentes en el mercado tienen en común la forma de su sección. Todas ellas son variantes del perfil de barrera en forma de “T” invertida, la cual debe ser el punto de partida para el diseño geométrico de una nueva barrera. En este apartado se evalúa la incidencia que tiene cada parámetro considerado durante la secuencia del choque. De esta manera se tendrá un criterio de cómo incide la variación de un parámetro con relación al valor del índice de severidad de impacto (ASI).

En la Figura 3.1 se muestra un perfil tipo con la asignación de cada uno de los parámetros junto a la imagen de la parte delantera del vehículo, inclinado en 20º, de acuerdo con el estipulado en el ensayo TB11 de la norma EN 1317. Además, para evaluar mejor la función geométrica de la barrera durante la secuencia del choque, se divide el perfil en 3 zonas distintas: el plinto, la parte superior del perfil y la anchura de la coronación de la barrera (e).

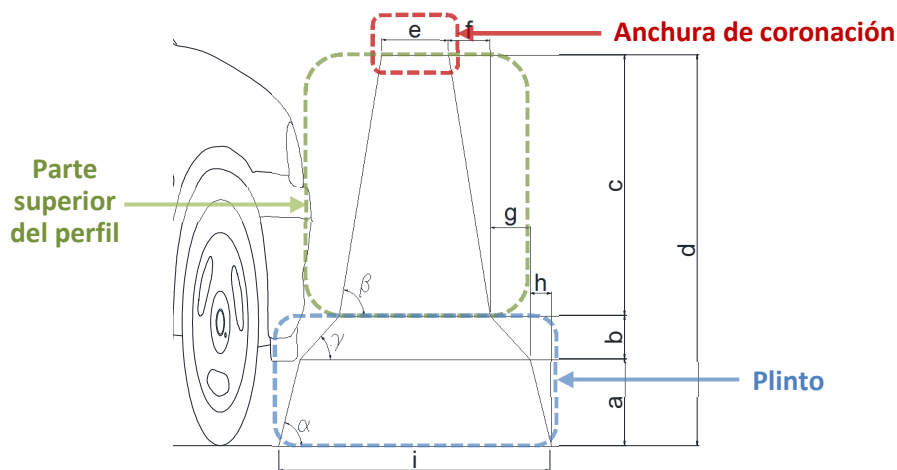


Figura 3.1. Parámetros considerados del perfil para el diseño.

### Plinto

La función del plinto corresponde al modo de impacto de la rueda y del parachoques contra la barrera. Según cómo se produzca el impacto en esta zona y la mayor o menor facilidad de deslizamiento del vehículo sobre ella, dependerá en gran parte del valor que se obtenga en el índice de severidad de impacto. Las variables geométricas que se agrupan en esta zona son los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $g$  y  $h$ ; y los ángulos  $\alpha$  y  $\gamma$ . A continuación se describe cada variable geométrica.

**Parámetro  $a$ :** Indica la altura del primer escalón y es la zona donde se produce el primer impacto de la rueda del vehículo. Debido a la rigidez del conjunto rueda-eje, en el instante de colisión se produce, usualmente, la rotura del eje con la rueda. Cuanto mayor sea  $a$ , la rueda experimentará una mayor dificultad de remonte sobre la barrera, absorbiéndose mayor energía de impacto a través del bastidor del coche.

**Ángulo  $\alpha$ :** Determina la facilidad de subida de la rueda del vehículo por el perfil. Cuanto más agudo sea este ángulo, más facilidad de subida del vehículo sobre la barrera, con lo que el impacto sería menos brusco y más progresivo durante el choque.

**Parámetro  $b$ :** Es la zona de transición. El perfil se adapta a la forma del frontal del vehículo. En esta zona se produce un primer deslizamiento del parachoques del coche y, a continuación, un segundo deslizamiento de la rueda cuando el vehículo remonta sobre el perfil durante el choque. Se debería adaptar el parámetro  $b$  a la forma del vehículo para conseguir la mayor superficie de contacto y así conseguir un mayor rozamiento, con lo que disminuiría la violencia del primer impacto.

**Ángulo  $\gamma$ :** Junto el parámetro  $b$  determina la altura de la zona de transición. De la misma manera que con el valor  $b$ , se debe adaptar el valor del ángulo a las medidas de la parte frontal del coche.

### Parte superior del perfil

La función de la parte superior del perfil, que desempeña durante el choque, es la de limitador del deslizamiento del vehículo sobre la barrera y redireccionarlo hacia su carril de circulación. Las variables geométricas que se agrupan en esta zona son el parámetro  $c$  y el ángulo  $\beta$ . Acto seguido, se describe cada variable geométrica.

Parámetro  $c$ : Corresponde a la parte superior de la barrera hasta llegar a la cota de coronación. Su función va estrechamente ligada con el valor del ángulo  $\beta$ , que determina el límite de deslizamiento del vehículo sobre la barrera y lo redirecciona al carril de circulación.

Ángulo  $\beta$ : Según el valor de este ángulo, cuanto menor sea el valor de  $\beta$ , mayor facilidad de subida del coche sobre el perfil. Su función principal es evitar que el vehículo invada el carril contrario o que sobrevuele la barrera por encima.

### Anchura de coronación

La anchura de coronación sólo depende del parámetro  $e$ . Esta variable determina el grosor de coronación del perfil. Su incidencia es nula frente al comportamiento del vehículo con la barrera durante el choque. Este parámetro deberá tener un espesor mínimo, por un lado, mantener la forma en estado fresco y, por otro lado, resistir el impacto del coche y evitar la rotura de la barrera. La anchura de coronación que se determina de inicio es de **170 mm** en base a la experiencia de las empresas constructoras del proyecto BAHORIS, pudiéndose reducir el valor de esta variable en el desarrollo de este estudio.

### Otros parámetros

Parámetro  $d$ : Determina la altura total del perfil. Cuanto mayor sea la altura del perfil, más difícil será que el vehículo invada el carril contrario. Además, para vehículos con centro de gravedad elevado respecto al suelo, como los autobuses, cuanto mayor sea la altura del perfil, menor será la probabilidad de vuelco del vehículo sobre la barrera. Esta variable, si bien inicialmente se plantea como fija inicialmente con un valor de **900 mm** podría modificarse a la baja en función de los resultados.

Parámetros  $f$ ,  $g$  y  $h$ : Son las medidas en el plano horizontal de cada plano inclinado del perfil. Estos parámetros vienen dados por el par de valores dados por el ángulo y la longitud correspondientes descritos anteriormente. De manera específica, el parámetro  $f$  depende de  $c - \beta$ , el parámetro  $g$  depende de  $b - \gamma$ ; y el parámetro  $h$  depende de  $a - \alpha$ .

Parámetro  $i$ : Define el ancho total del perfil que obedecerá según el valor de los parámetros  $e$ ,  $f$ ,  $g$  y  $h$ . En conjunto, una menor dimensión de este parámetro conduce a una menor área y, consecuentemente, un menor empleo de recursos, lo cual resulta interesante desde el punto de vista económico y ambiental. Se propone que este valor esté próximo a los **600 mm** para hacerla competitiva con otras barreras ya existentes.

### 3.3.- EVOLUCIÓN DE LAS PROPUESTAS EN LA SIMULACIÓN

El punto de partida de este estudio se inicia con el perfil CSB, el cual, desde 1995, es el perfil de referencia en el ámbito europeo, considerado como una barrera de clase B. En base a este perfil, se empiezan a proponer varias propuestas de perfiles para obtener la mejor geometría que consiga el menor ASI posible. Antes de entrar a analizar los resultados de las diferentes propuestas se describe el modelo de simulación utilizado y los condicionantes que están sujetos sus resultados.

#### 3.3.1- Condiciones de contorno del modelo de simulación

Dentro del proyecto BAHORIS donde se encuentra el marco de estudio de esta tesis, la empresa Applus IDIADA lleva a cabo las simulaciones numéricas de todas las propuestas de perfiles. El modelo numérico empleado es el programa LS-DYNA cuyas características, descripción y modo de uso se pueden encontrar en la web oficial de la empresa de software *Livermore Software Technology Corporation (LSTC)* o también en las diferentes guías para el usuario como la *Users manual for LS-DYNA concrete material model 159 (2007)* para el material con hormigón. El programa se modifica por el mismo ente y su uso es restringido. Gracias a la colaboración con esta empresa, se facilitan los resultados de cada simulación para analizar y poder ver qué parámetros geométricos responden mejor para obtener el menor ASI posible.

Previo a la simulación, con cada propuesta de perfil, se calibra el modelo comparando su evolución en el tiempo de las aceleraciones en dirección X, Y y Z y, sobre todo, del desarrollo en el tiempo del índice ASI. Después de calibrar y ajustar el programa a la reproducibilidad del ensayo de impacto real, se inician las simulaciones de las propuestas de perfiles. También es importante remarcar que durante el desarrollo de las diferentes series de propuestas, el modelo se ha ido ajustando y variando su comportamiento para reproducir con la mayor precisión posible la realidad que se da en el ensayo de impacto.

#### 3.3.2- Desarrollo de las propuestas: perfiles 1 - 52

En este apartado se presenta el análisis y evolución de los resultados de las distintas propuestas de perfiles numerados entre el 1 y el 52. En esta primera fase de propuestas se han simulado un total de 42 perfiles repartidos en 7 series. Los perfiles de referencia son los numerados con R1 (perfil *Concrete Step Barrier, CSB*) y con R2 (perfil Inicial). Los perfiles propuestos para diseñar el perfil son los numerados del 1 al 22, y del 35 al 52. El salto producido del 22 al 35, corresponde a los perfiles que llevan asociados salientes en su parte media, como ejercicio teórico, que no responde a una realidad, utilizado como contraste del modelo.

En la Tabla 3.1 se presenta la distribución de las series y los objetivos que se persiguen en cada una. En lo que sigue se presentan los detalles de cada simulación así como agrupado en 7 series con un número variable de simulaciones en cada una de ellas (de 2 a 12 simulaciones).

Serie	Número de propuestas	Numeración de los perfiles	Objetivo de la serie
1	2	R1 - R2	Obtener el ASI del perfil CSB
2	12	1 - 12	Perfiles CSB e Inicial como base de partida
3	11	13 - 22	Orientada a que el frontal del vehículo absorba una mayor cantidad de energía
4	3	35 - 37	Acotar el parámetro a
5	3	38 - 41	Analizar la influencia del ángulo $\gamma$
6	4	42 - 45	Influencia de la disminución del ángulo $\gamma$
7	3	46 - 48	Influencia de los parámetros b, $\alpha$ y $\beta$
8	4	49 - 52	Medidas para disminuir anchura y sección del perfil

Tabla 3.1. Distribución de las series y de los objetivos de los perfiles del 1 al 52.

#### 1ª Serie: Obtener el ASI del perfil CSB

El primer paso para empezar la propuesta de perfiles es saber el valor ASI del perfil CSB. De esta manera se quiere saber qué valor ASI se registra en el modelo y ver si se está o no alejando de un  $ASI \leq 1,4$ . Además, se propone un segundo perfil (R2) siguiendo la referencia del perfil R1 y que servirá como punto de partida de la campaña de propuestas. En la Tabla 3.2 se presentan los datos geométricos de los dos perfiles y también los resultados del ASI de simulación.

1º Serie	R1	R2	1º Serie	R1	R2
a (mm)	250	240	h (mm)	35	42,3
b (mm)	50	85	i (mm)	540	566
c (mm)	600	545	$\alpha$ (deg)	82	80
d (mm)	900	870	$\gamma$ (deg)	45	55
e (mm)	200	170	$\beta$ (deg)	82	80
f (mm)	85	96	Área (m <sup>2</sup> )	0,318	0,307
g (mm)	50	60	ASI	2,14	2,04

Tabla 3.2. Resultados de las simulaciones de los perfiles CSB (R1) e Inicial (R2).

Como se puede ver, las características geométricas de ambos perfiles son muy parecidas, aunque con leves modificaciones. Entre las variaciones, el perfil R1 destaca por una mayor anchura de coronación (e) y altura total (d) y de una menor anchura total. También se quiere resaltar de la mayor dimensión de la zona de transición entre el plinto y la parte superior de la barrera (parámetros b, g y  $\gamma$ ) del perfil R2 respecto al R1. Evaluando los resultados del ASI, sorprenden los valores tan elevados obtenidos para ambos perfiles por encima de 2. Sobre todo,

sabiendo que el perfil CSB es una barrera considerada como clase B, y por tanto, se deben registrar valores del ASI iguales o inferiores a 1,4.

Esta gran diferencia suscita coger este resultado con mucho cuidado e implica dos opciones: o el modelo de simulación se encuentra muy lejano a la realidad y es necesario revisarlo de nuevo; o que el perfil CSB puede que no sea un perfil tan bueno. Ante esta situación de duda, se procede a realizar un ensayo de impacto con el perfil Inicial para poder contrastar el resultado numérico con el real y también poder saber en qué valores ASI se está trabajando realmente. Se escoge el perfil Inicial ya que es el perfil que ha dado un mejor ASI de simulación.

### 2ª Serie: Perfiles CSB e Inicial como base de partida

La segunda Serie de propuestas está compuesta por un total de 12 perfiles que tienen como punto de partida los perfiles CSB e Inicial. En ellos se busca la altura óptima del primer escalón (parámetro a) y los valores de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  que den como resultado el menor ASI. En la Tabla 3.3 se muestran las medidas de cada uno de los perfiles propuestos, además de los resultados obtenidos por el modelo numérico con el valor ASI máximo de cada ensayo.

	2ª Serie											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a (mm)	200	200	200	250	250	250	300	300	300	100	100	100
b (mm)	1	50	100	1	50	100	1	50	100	1	50	100
c (mm)	699	650	600	649	600	550	599	550	500	799	750	700
d (mm)	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
e (mm)	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170
f (mm)	12,2	68,3	105,8	11,3	63,1	97,0	10,5	57,8	88,2	13,9	78,8	123,4
g (mm)	1	50	100	1	50	100	1	50	100	1	50	100
h (mm)	3,5	21,0	35,3	4,4	26,3	44,1	5,2	31,5	52,9	1,7	10,5	17,6
i (mm)	203,4	448,7	652,1	203,4	448,7	652,1	203,4	448,7	652,1	203,4	448,7	652,1
$\alpha$ (deg)	89	84	80	89	84	80	89	84	80	89	84	80
$\gamma$ (deg)	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
$\beta$ (deg)	89	84	80	89	84	80	89	84	80	89	84	80
Área (m <sup>2</sup> )	0,168	0,258	0,337	0,168	0,263	0,345	0,168	0,267	0,353	0,167	0,249	0,321
ASI	2,35	2,17	1,74	2,35	2,17	1,90	2,33	2,30	2,09	2,34	2,25	2,00

Tabla 3.3. Resultados de las simulaciones 1 -12.

En ella se aprecia que el perfil 3 es, con diferencia, en el que se obtiene un ASI menor (1,74). Si bien tiene la desventaja de que este perfil requiere un mayor consumo de hormigón, comparando con las principales barreras existentes (CSB, New Jersey (NJ) y F), donde representa una sección con un 6% superior al perfil CSB, un 28% superior al perfil F y un 35% superior al perfil NJ.

Con el objetivo de realizar un análisis más completo de los resultados, se ha llevado a cabo un estudio para determinar los valores de los parámetros del perfil que impliquen un ASI mínimo. El primer gráfico que se presenta, Figura 3.2, relaciona el ASI con los parámetros  $a$  y  $b$ .

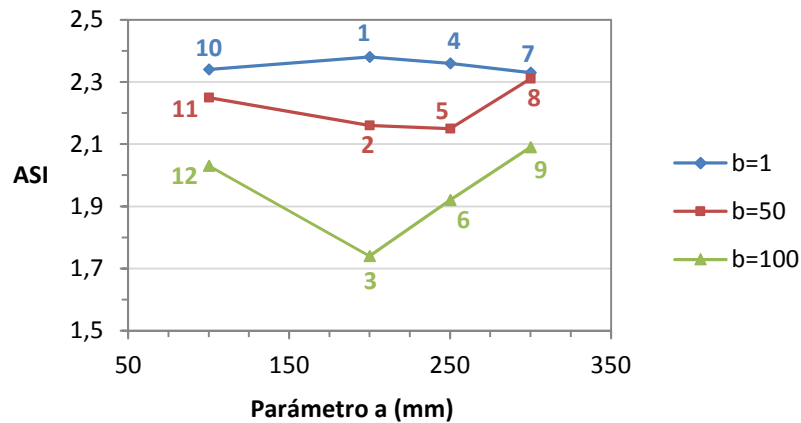


Figura 3.2. Influencia de los parámetros  $a$  y  $b$  en el ASI.

En primer lugar se observa que los valores del ASI se sitúan por encima de 1,7 en todos los casos (valores altos para el objetivo perseguido), presentándose los valores menores en el entorno del valor de  $a = 200$  mm. En segundo lugar, en ese contexto, el parámetro  $b$  se muestra como otra variable principal, obteniéndose mejores resultados a medida que aumenta  $b$  ( $b = 100$  mm), si bien ello implica un aumento del área de sección transversal y, consecuentemente, del volumen de hormigón, lo que repercute negativamente desde el punto de vista económico y ambiental.

En la Figura 3.3 se relaciona el ASI con la altura y el ángulo del primer escalón (parámetros  $a$  y  $\alpha$ ). Los resultados siguen una tendencia similar a la mostrada en la Figura 3.2, encontrándose un óptimo, del parámetro  $a$ , en el entorno de los 20 mm y una influencia significativa del ángulo  $\alpha$ . Los mejores resultados se obtienen a medida que se reduce el ángulo  $\alpha$ , mientras que los peores resultados se obtienen para un  $\alpha = 90^\circ$  (pared vertical en ese tramo).

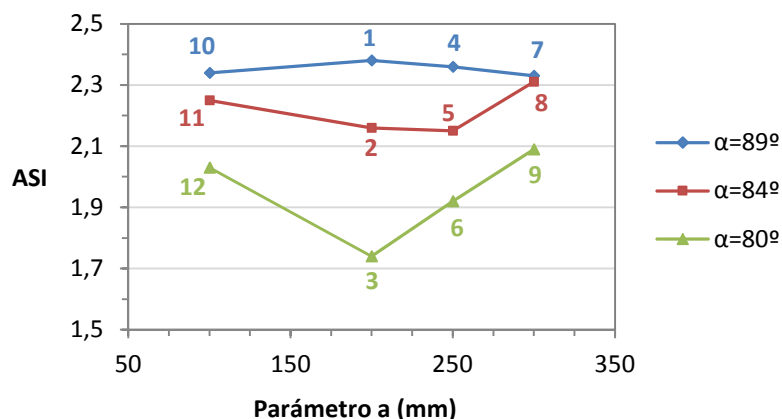


Figura 3.3. Influencia de los parámetros  $a$  y  $\alpha$  en el ASI.

Por lo tanto, se deberán proponer  $\alpha \leq 80^\circ$ , con valores de  $a$  alrededor de 200 mm. Este análisis es análogo también para la relación ASI -  $a - \beta$ , debido a que el ángulo  $\beta$  tiene el mismo valor que  $\alpha$  en cada una de las doce propuestas de esta primera tanda. Así que, los mejores resultados se obtienen cuando menor sea el ángulo  $\beta$ .

Como conclusión de esta segunda Serie de propuestas se determina que el perfil de referencia para la siguiente Serie es el perfil 3. Los valores de los parámetros de los perfiles a definir deberán ser:  $a \approx 200$  mm,  $b \geq 100$  mm,  $\alpha \leq 80^\circ$  y  $\beta \leq 80^\circ$ . Además, en esta fase se acordó proponer formas de perfil extremas para acotar y ver el comportamiento límite del vehículo, desde un perfil con un ángulo de  $70^\circ$ , perfil con un saliente y hasta un perfil vertical.

### 3ª Serie: Orientada a que el frontal del vehículo absorba una mayor cantidad de energía

Para la tercera Serie de propuestas se definieron un total de 9 perfiles, numerados del 13 al 22, además del perfil R3 (perfil Vertical). Estas propuestas se presentan en la Tabla 3.4 con sus correspondientes medidas geométricas e índice ASI obtenido por el modelo numérico.

	3ª Serie										
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	R3
a (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	160	160	900
b (mm)	100	100	100	100	50	50	1	1	152,5	152,5	-
c (mm)	600	600	600	600	650	650	699	699	587,5	587,5	-
d (mm)	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
e (mm)	170	170	170	170	170	170	170	170	170,6	170,6	170
f (mm)	18,4	52,5	63,1	10,5	114,6	11,4	123,3	73,5	103,6	103,6	-
g (mm)	100	100	100	100	50	50	1	1	264,1	264,1	-
h (mm)	72,8	53,6	21,0	3,5	35,3	3,5	35,3	21,0	28,2	28,2	-
i (mm)	952,4	582,2	538,2	397,9	569,8	299,7	489,0	361,0	962,5	962,5	201,4
$\alpha$ (deg)	70	75	84	89	80	89	80	84	80	80	89
$\gamma$ (deg)	45	45	45	45	45	45	45	45	30	30	-
$\beta$ (deg)	70	85	84	89	80	89	80	84	80	80	-
Área (m <sup>2</sup> )	0,480	0,277	0,283	0,216	0,314	0,189	0,296	0,239	0,409	-	0,167
ASI	1,47	1,94	1,93	2,09	1,99	2,31	2,21	2,3	1,55	1,71	2,35

Tabla 3.4. Resultados de las simulaciones 13 - 22.

Con el objetivo de que el frontal del vehículo absorba una mayor cantidad de energía, al perfil 22 se le ha añadido un saliente de 500 x 200 mm a media altura. El perfil 13 es el que tiene un menor ángulo de inclinación con un ángulo de  $70^\circ$  excepto el ángulo  $\gamma$ .

Los resultados ASI de la Tabla 3.4 muestran que el ASI del perfil R3 es el mayor de todos e incluso el mayor de las series presentadas. Este hecho se debe a que la forma vertical del perfil no facilita el deslizamiento y la deformación del coche sobre la barrera. Por tanto, se puede decir que en cierta medida, el perfil R3 es el límite superior en barreras continuas rígidas de hormigón.



En el otro extremo de esta 3ª Serie se encuentran los perfiles 13 y 21 que ofrecen unos valores de ASI mínimos (1,47 y 1,55 respectivamente). El inconveniente de estos dos perfiles es una sección excesiva que las hace inviables, ya que representan áreas superiores al 28% respecto al perfil CSB, y, en el peor de los casos, incluso del 92% del perfil F.

A raíz de la simulación con el perfil 13 se comprobó que, cuanto menos tendido sea el perfil y más facilidad de remonte para el vehículo, el impacto es menos brusco resultando un ASI menor, lo cual parece razonable, si bien también puede significar un riesgo de vuelco, que el modelo no permite modelizar en esta fase. Por lo tanto, en un principio parecía razonable proponer para la Serie posterior nuevos perfiles con ángulos inferiores a 70°. Sin embargo, después de analizar el vídeo de la simulación, se observó que el vehículo se eleva en exceso por encima de la propia barrera, tal y como se puede observar en la Figura 3.4.a.



Figura 3.4. Simulaciones de los perfiles 13 (a), 21 (b) y 22 (c).

El otro perfil de especial interés en esta segunda tanda de propuestas es el 21 (Figura 3.4.b). Este perfil tiene un primer escalón inferior al recomendado ( $a = 200$  mm), pero con una segunda transición más pronunciada que el resto de series planteadas hasta ahora con una  $b = 152,5$  mm y un ángulo de 30°. Es interesante analizar la relevancia de esta segunda transición, ya que para un valor  $a = 160$  mm, se tiene un ASI = 1,55. Por lo tanto, para posteriores tandas se recomienda valores de  $b \geq 100$  mm y  $\gamma \leq 45^\circ$ .

Con respecto al perfil 22, Figura 3.4.c, caso teórico en el que se introduce un obstáculo horizontal, el resultado del ASI es relativamente bajo (1,71), cuya causa se debe que el choque del saliente se produce en la parte más deformable del vehículo, ayudando así a disminuir la violencia de la colisión.

Rebasar la altura de la barrera implica el riesgo de invadir el sentido contrario. Además, en la normativa EN 1317 estipula que el vehículo no se puede elevar por encima de la cota de coronación de la barrera. Así que, observando lo sucedido con el perfil 13, se concluye que este perfil no es válido, con lo que se deberán proponer barreras con ángulos  $80^\circ \geq \alpha = \beta > 70^\circ$ .

Para visualizar mejor esta tendencia, en la Figura 3.5 se muestran los ASIs correspondientes a los perfiles 3, 13, 15 y 16 en relación a los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ , siendo  $\alpha = \beta$ . En esta gráfica se reafirma la tesis de la tendencia a la baja de los valores ASI según van disminuyendo los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ . Acorde a evitar al excesivo vuelo del vehículo (valores cercanos

a 70°) y al observar que la disminución de ASI es más moderada entre los 80° y 70°, se recomienda proponer valores de  $80^\circ \geq \alpha/\beta > 75^\circ$ .

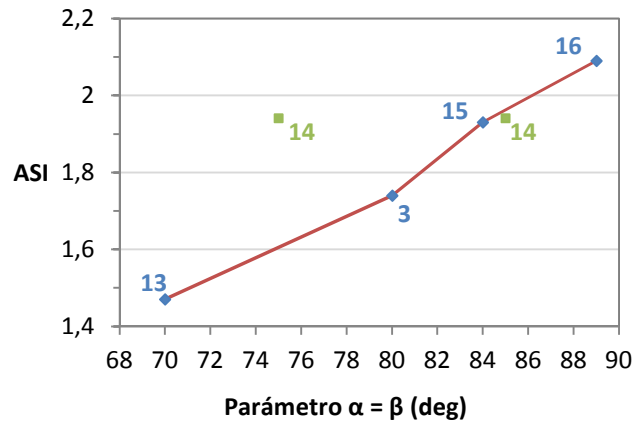


Figura 3.5. Influencia de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  en el ASI.

A partir de la conclusión llegada para los valores más óptimos de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ , el siguiente paso es saber cuál de los dos ángulos es más influyente. En esta Serie sólo se cuenta con el perfil 14 para poder desvelar esta incertidumbre. Este perfil tiene los mismos valores que los perfiles 3, 13, 15 y 16 pero con  $\alpha = 75^\circ$  y  $\beta = 85^\circ$ .

En la citada Figura 3.5 se visualiza como el perfil 14 se encuadra dentro de la línea de tendencia de los restantes perfiles de iguales características considerando el perfil 14 para  $\beta = 85^\circ$ . En cambio, para  $\alpha = 75^\circ$ , el perfil 14 se desvincula totalmente de la tendencia de los resultados a la baja. Por tanto, a la espera de observar si en posteriores ejemplos se cumple dicha afirmación, para este caso se puede decir que el valor predominante es claramente el parámetro  $\beta$ .

Para acabar con el análisis de esta segunda tanda de propuestas, los perfiles 17, 18, 19 y 20 no se consideran debido a los altos valores de ASI obtenidos debido a los bajos valores de  $b$  (valores de 50 y 1 mm).

Como conclusión de esta tercera Serie de propuestas se determina que el perfil a definir para posteriores series deberá ser:  $a \approx 200$  mm,  $b \geq 100$  mm,  $80^\circ \geq \alpha/\beta > 75^\circ$  y  $\gamma \leq 45^\circ$ .

#### 4ª Serie: Acotar el parámetro $a$

Para la cuarta Serie de propuestas se definieron un total de 3 perfiles, numerados del 35 al 37 (ver Tabla 3.5). En esta Serie se ha querido acotar el parámetro  $a$  para poder afirmar con claridad qué valor es el óptimo y por ello se han planteado estas tres series con  $a = 150, 180$  y  $220$  mm, respectivamente. Los valores del resto de los parámetros son los mismos que en el perfil 3 tomado como referencia. Tal y como se puede ver en la Tabla 3.5, las medidas

geométricas de los perfiles varían poco, con anchuras totales entorno a los 65 cm y secciones entre 0,33 y 0,34 m<sup>2</sup>.

	Referencia	4ª Serie			5ª Serie			
	3	35	36	37	38	39	40	41
a (mm)	200	150	180	220	150	180	200	220
b (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100
c (mm)	600	650	620	580	650	620	600	580
d (mm)	900	900	900	900	900	900	900	900
e (mm)	170	170	170	170	170	170	170	170
f (mm)	105,8	114,6	109,3	102,3	114,6	109,3	105,8	102,3
g (mm)	100	100	100	100	36,4	36,4	36,4	36,4
h (mm)	35,3	26,5	31,7	38,8	26,5	31,7	35,3	38,8
i (mm)	652,1	652,1	652,1	652,1	524,9	524,9	524,9	524,9
α (deg)	80	80	80	80	80	80	80	80
γ (deg)	45	45	45	45	70	70	70	70
β (deg)	80	80	80	80	80	80	80	80
Área (m <sup>2</sup> )	0,337	0,329	0,334	0,340	0,303	0,305	0,305	0,306
ASI	1,74	1,82	1,89	1,79	2,18	2,14	2,14	2,14

Tabla 3.5. Resultados de las simulaciones patrón (3) Serie 4 (35, 36 y 37) y Serie 5 (38, 39, 40 y 41).

De forma análoga a las tandas anteriores, en la Figura 3.6 se presenta la gráfica ASI - a de los perfiles 3, 35, 36 y 37; además de los perfiles 6, 9 y 12 que son iguales al perfil 3 pero con valores de a iguales a 250, 300 y 100 mm respectivamente. En la gráfica se contempla una discontinuidad dentro de la tendencia de producirse un mínimo alrededor de a = 200 mm. Este repunte se produce para a = 180 mm (perfil 36). A primera instancia se achacó a un error del programa simulado, pero después de la revisión del ensayo del perfil 36 realizada por los técnicos de IDIADA se concluyó que este repunte se debía al contacto de la llanta con el borde del primer escalón. Por tanto, el valor a debe ser igual o en torno a 200 mm.

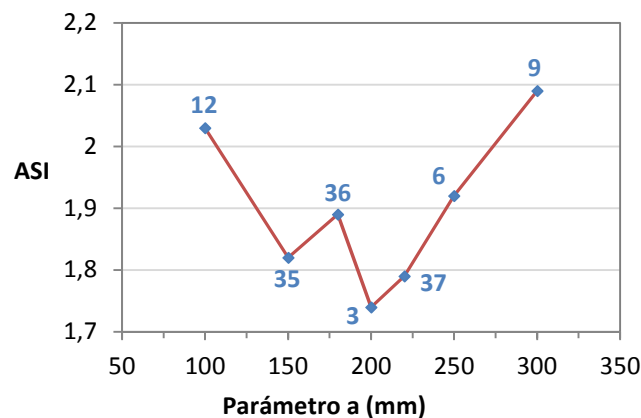


Figura 3.6. Influencia del parámetro a en el ASI.

Como conclusión de esta tercera Serie de propuestas se determina que el perfil a definir para posteriores series deberá ser:  $a = 200 \text{ mm}$ ,  $b \geq 100 \text{ mm}$ ,  $80^\circ \geq \alpha/\beta > 75^\circ$  y  $\gamma \leq 45^\circ$ .

*5ª Serie: Analizar la influencia del ángulo  $\gamma$*

Para la quinta Serie de propuestas se definieron un total de 4 perfiles, numerados del 38 al 41. En esta Serie se propuso conocer el resultado de aumentar el ángulo  $\gamma$  hasta los  $70^\circ$  en lugar de los  $45^\circ$  establecidos en los perfiles anteriores excepto en el 21. En la 2ª parte de la Tabla 3.5 se exponen los datos geométricos y el índice ASI de esta Serie.

En dicha tabla destacan los elevados valores ASI que se registraron, todos ellos iguales o superiores a 2,14. Se puede afirmar que aumentar el ángulo  $\gamma$  implica aumentar de manera significativa el valor ASI. Es curioso ver en este caso que la variación del parámetro “a” no tiene incidencia en los ASIs de estas simulaciones.

Como conclusión de esta quinta Serie de propuestas se determina que el perfil a definir para posteriores series deberá ser:  $a = 200\text{mm}$ ,  $b \geq 100\text{mm}$ ,  $80^\circ \geq \alpha/\beta > 75^\circ$  y  $\gamma \leq 45^\circ$ .

*6ª Serie: Influencia de la disminución del ángulo  $\gamma$*

Para la sexta Serie de propuestas se definieron un total de 4 perfiles, numerados del 42 al 45 (ver Tabla 3.6). En esta Serie se pretendía conocer las consecuencias de disminuir el ángulo  $\gamma$  de la segunda transición hasta  $30^\circ$  donde, hasta este momento, se habían propuesto valores de  $45^\circ$  y  $70^\circ$ .

	6ª Serie				Referencia	7ª Serie		
	42	43	44	45		3	46	47
a (mm)	150	180	200	220	200	200	200	200
b (mm)	100	100	100	100	100	120	100	100
c (mm)	650	620	600	580	600	580	600	600
d (mm)	900	900	900	900	900	900	900	900
e (mm)	170	170	170	170	170	170	170	170
f (mm)	114,6	109,3	105,8	102,3	105,8	102,3	160,8	160,8
g (mm)	173,2	173,2	173,2	173,2	100	120	100	100
h (mm)	26,5	31,7	35,3	38,8	35,3	35,3	35,3	42,5
i (mm)	798,5	798,5	798,5	798,5	652,1	685,1	762,1	776,6
$\alpha$ (deg)	80	80	80	80	80	80	75	75
$\gamma$ (deg)	30	30	30	30	45	45	45	45
$\beta$ (deg)	80	80	80	80	80	80	80	78
Área (m <sup>2</sup> )	0,358	0,367	0,374	0,380	0,337	0,347	0,403	0,404
ASI	1,82	1,41	1,32	1,53	1,74	1,68	1,76	1,71

Tabla 3.6. Resultados de las simulaciones Serie 6 (42, 43, 44 y 45) y patrón (3) Serie 7 (46, 47 y 48).

Con esta tanda, se obtuvieron ASIs más bajos con un valor mínimo para el perfil 44 de 1,32 ( $a = 200$  mm); por lo tanto, este perfil sería de clase B ( $1 < ASI \leq 1,4$ ). El inconveniente que tiene el perfil 44 es que tiene una sección excesiva que representa un 17,6% más de sección que el perfil CSB, un 42,2% superior al perfil F y un 49,6% al NJ.

Para comprender de manera más clara los resultados ASI y la incidencia que tienen el ángulo  $\gamma$  y el parámetro  $a$ , se muestra la gráfica de la Figura 3.7. En ella se expone la relación existente entre las dos variables y sus valores más óptimos. Se observa claramente la incidencia del ángulo  $\gamma$  en los valores ASI, obteniendo que cuanto menor es el valor gamma, menores son los valores ASI. Para ángulos de  $70^\circ$ , los ASI se sitúan por encima de 2, para  $45^\circ$  alrededor de 1,8 y para  $30^\circ$  se registran los valores ASI menores produciéndose un valor mínimo ASI de 1,32 correspondiente en  $a = 200$  mm. Por tanto, el valor óptimo en esta gráfica es el perfil 44, que corresponde a este mínimo comentado. Para posteriores propuestas se deberán proponer valores gamma inferiores o iguales a  $30^\circ$  para seguir la tendencia a la baja de los valores ASI.

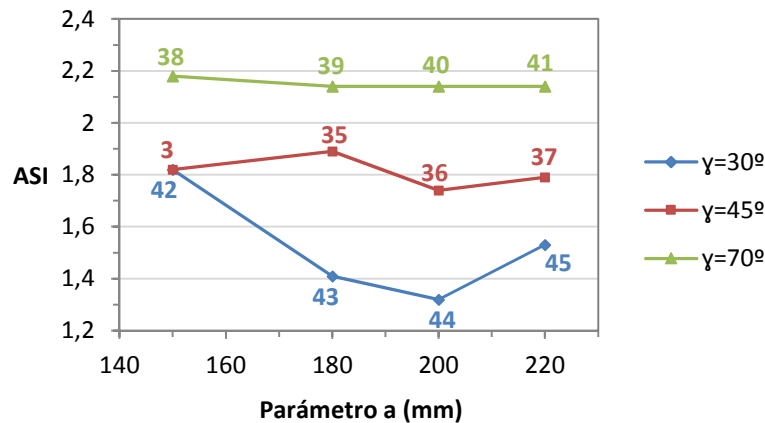


Figura 3.7. Influencia de los parámetros  $a$  y  $\gamma$  en el ASI.

Otra observación a tener en cuenta, es que para  $a = 180$  mm, no se produce ningún repunte debido al contacto de la llanta con el perfil para valores de gamma iguales a  $30^\circ$  y  $70^\circ$ , tal y como se había apreciado y comentado en el caso de  $\gamma = 45^\circ$  del perfil 35.

Como conclusión de esta sexta partida de propuestas se determina que el perfil a definir para posteriores series deberá ser:  $a = 200$  mm,  $b \geq 100$  mm,  $80^\circ \geq \alpha/\beta > 75^\circ$  y  $\gamma \leq 30^\circ$ .

#### 7ª Serie: Influencia de los parámetros $b$ , $\alpha$ y $\beta$

Para la séptima Serie de propuestas se definieron un total de 3 perfiles: 46, 47 y 48. En esta Serie se ha querido comprobar el cambio del parámetro  $b$  desde 100 mm a 120 mm (perfil 46) y la variación de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  de los perfiles 47 y 48. Estos tres perfiles se compararán con el perfil 3 que servirá de referencia para poder evaluar el efecto que tienen estos retoques. En la 2ª parte de la Tabla 3.6 se muestran las características geométricas y los resultados de la simulación.

Comparando los perfiles 3 y 46, el hecho de aumentar el parámetro  $b$  de 100 a 120 mm implica una disminución del ASI de 0,06 puntos. Así que, una mayor transición del plinto a la parte superior del perfil incide un ASI más bajo. De este modo, para posteriores series se deberán proponer valores de  $b$  mayores.

A priori, al comparar el perfil 47 con el 3, se debería esperar un valor ASI menor al disminuir el ángulo  $\alpha$  hasta  $75^\circ$ , pero sucedió lo contrario, aumentó en 0,02 puntos. Se deduce con este resultado que, para posteriores propuestas, el ángulo  $\alpha$  deberá ser igual a  $80^\circ$ . Si se compara el perfil 47 con el 46, reduciendo el ángulo  $\beta$  en  $2^\circ$ , se consigue una reducción del ASI de 0,05 puntos. El parámetro determinante entre  $\alpha$  y  $\beta$  es el ángulo  $\beta$ , tal y como se propuso a primera instancia en los comentarios de la segunda tanda de propuestas. Por tanto, es de interés proponer nuevos perfiles con valores de  $\beta$  inferiores a  $78^\circ$ .

Como conclusión de esta séptima partida de propuestas se determina que el perfil a definir para posteriores series deberá ser:  $a = 200\text{mm}$ ,  $b \geq 120\text{mm}$ ,  $\alpha = 80^\circ$ ,  $\beta \leq 78^\circ$  y  $\gamma \leq 30^\circ$ . Estos valores recomendados para obtener el menor ASI posible se deberán apoyar con una sección de barrera aceptable no superior al 10% del perfil CSB.

#### 8ª Serie: Medidas para disminuir anchura y sección del perfil

Para la octava y última Serie de propuestas, se definieron un total de 4 perfiles numerados del 49 al 52. En esta Serie se quiso reducir, en lo posible, la sección de barrera adoptando un espesor de cabeza de 150 mm en vez de los 170 mm. Además se adoptó un ángulo  $\alpha = 82^\circ$  aumentando en  $2^\circ$  el recomendado y la proposición de valores de  $b \leq 100$  mm para contribuir en la disminución de sección.

En el caso del perfil 52 se añadieron unos pequeños salientes en forma de dientes en las zonas pertenecientes a los parámetros  $b$  y  $c$  (ver Figura 3.8). Esta medida es para aumentar la rugosidad de la barrera y ver si tiene un comportamiento satisfactorio para el vehículo durante el choque.

En la Tabla 3.7 se muestran las características geométricas y los resultados de la simulación. En ella se observa que ninguno de los perfiles propuestos cumple con la restricción de obtener un  $\text{ASI} \leq 1,4$ . Si se compara el perfil 49 con el 44, la diferencia del valor ASI es de +0,09 puntos con las únicas variaciones geométricas de los ángulos:  $\alpha = 82^\circ$  y  $\gamma = 28^\circ$ . Esta diferencia entre valores ASI es mayor que el valor esperado ya que el aumento de  $\alpha$  en  $2^\circ$  no debería afectar al resultado y la disminución de  $\gamma$  en  $2^\circ$  tendría que haber ayudado a disminuir el valor ASI. Por tanto, siendo conservadores, es aconsejable tomar para posteriores propuestas:  $\alpha \geq 80^\circ$  y  $35^\circ \geq \gamma \geq 30^\circ$ .

En cuanto a los perfiles 50, 51 y 52, se pretendió comprobar qué afectación tendría el hecho de disminuir el parámetro  $b$  con valores de 80 y 52 mm y compensar esta medida con ángulos  $\gamma$  de  $30^\circ$  y  $35^\circ$ . Se obtuvieron valores ASI entre 1,63 y 1,75 que no satisfacían las

exigencias para obtener un barrera clase B. Quedó clara la relevancia de imponer, como mínimo, un valor  $b \geq 100$  mm para obtener valores ASI por debajo de 1,4.

En el caso específico del perfil 52, el ASI resultante ha sido el peor de todos los de esta serie a causa de, en gran parte, el bajo valor adoptado del parámetro  $b$  (sólo 52 mm cuando lo aconsejable es  $b \geq 100$  o 120 mm). Este mal resultado también se le puede atribuir a la rugosidad implementada en este perfil, tal y como se puede ver en la Figura 3.8. La inclusión de una mayor rugosidad de la barrera implica mayor dificultad de deslizamiento del coche lo que implica desaceleraciones más acusadas que conllevan valores ASI más elevados.

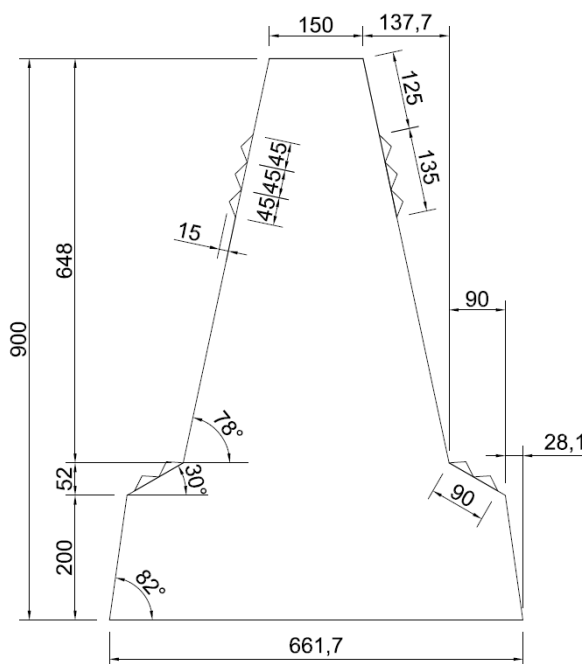


Figura 3.8. Perfil 52. Cotas en mm.

	8ª Serie			
	49	50	51	52
a (mm)	200	200	200	200
b (mm)	100	80	80	52
c (mm)	600	620	620	648
d (mm)	900	900	900	900
e (mm)	150	150	150	150
f (mm)	105,8	109,3	131,8	137,7
g (mm)	188	114	114	90
h (mm)	28,1	28,1	28,1	28,1
i (mm)	794,0	653,4	698,3	661,8
$\alpha$ (deg)	82	82	82	82
$\gamma$ (deg)	28	35	35	30
$\beta$ (deg)	80	80	78	78
Área (m <sup>2</sup> )	0,362	0,324	0,351	0,340
ASI	1,41	1,7	1,63	1,75

Tabla 3.7. Resultados de las simulaciones 49 - 52.

Como conclusión de esta octava y última tanda de propuestas, se determina que el perfil idóneo a definir para el ensayo deberá ser:  $a = 200$  mm,  $b \geq 120$  mm (con  $b \geq 100$  mm también se obtienen buenos resultados),  $\alpha \geq 80^\circ$ ,  $\beta \leq 78^\circ$  (aunque es difícil cumplirlo debido al consumo de sección) y  $35^\circ \geq \gamma \geq 30^\circ$ .

Con todos los resultados obtenidos y con la condición de diseño de una sección no superior a  $0,350$  m<sup>2</sup>, se determina que la **barrera más óptima hasta la fecha es el perfil 51**. Aunque el ASI del modelo numérico no cumple la condición de ser menor o igual a 1,4, se cree oportuno realizar un ensayo real ya que en principio el resultado del modelo numérico sobrestima el valor ASI real. En el caso del perfil Inicial la sobrestimación era de +0,29 puntos ASI. Con este resultado, si se extrapola en el caso del perfil 51 con un ASI = 1,63, se podría obtener un ASI real de 1,34. Esta afirmación es solo una hipótesis que lo deberá corroborar el ensayo real.

### 3.3.3- Desarrollo de las propuestas: perfiles 53 - 74

Después de los resultados obtenidos en los ensayos de impacto con la barrera del perfil 51, se pretende continuar con el avance de nuevas propuestas de perfiles que mejoren las prestaciones de las anteriores con el fin de conseguir el objetivo inicial del estudio. Este apartado se ha estructurado en dos fases:

- Planteamiento inicial con los valores de los parámetros más óptimos encontrados hasta la fecha.
- Continuación de los análisis de resultados de los perfiles propuestos con el modelo numérico.

#### Planteamiento para nuevas propuestas

Antes de proceder a proponer nuevas propuestas de perfiles, se presentan en la Tabla 3.8 los valores aconsejables de los parámetros de la barrera. Estas recomendaciones son fruto de las conclusiones a las que se llegó en la primera etapa de propuestas (1 - 52) y que se presentan en formato resumen de las conclusiones llegadas.

Parámetros	Comentarios
a = 200 mm	Es posible que el mínimo se encuentre entre 190 y 200 mm
b ≥ 120 mm	Es aconsejable valores por encima de 120 mm, pero se han obtenido resultados satisfactorios con b ≥ 100 mm
c	Parámetro que no tiene incidencia, depende de a y b
d = 900 mm	Parámetro fijado
e = 150 mm	Proponer valores inferiores implica peligro de rotura
f	Parámetro que depende de c y β
g	Parámetro que depende de b y γ
h	Parámetro que depende de c y α
i	Parámetro que depende de e, f, g, h. Se recomienda obtener el menor ancho posible, a poder ser de 600 mm
α ≥ 80º	Parece ser que este parámetro tiene poca incidencia. Se recomienda aumentarlo
35º ≥ γ ≥ 30º	Parece ser que el valor óptimo es 30º o superior
β ≤ 78º	Para no aumentar sección, proponer valores inferiores a 78º es poco factible

Tabla 3.8. Valores de los parámetros a aconsejar.

El objetivo que se marca en las posteriores series es ver qué efecto tiene la ampliación de la zona de transición perteneciente al parámetro b, con valores de γ ≥ 30º, para distanciar los



dos planos correspondientes a los parámetros a y c. El inconveniente de esta recomendación es una mayor anchura de ocupación y también una mayor sección. Para minorar esta problemática, se plantea la posibilidad de modificar el perfil tipo de diseño con un nuevo plano en la forma geométrica de la barrera (ver Figura 3.9) en base para posteriores propuestas de perfil.

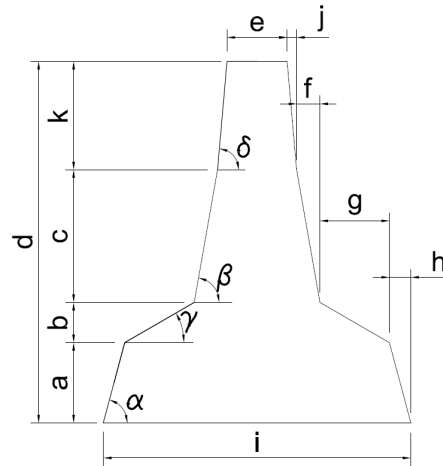


Figura 3.9. Parámetros del perfil de barrera con 4 planos.

Se observa en la citada figura, que el nuevo plano añadido se encuentra entre el parámetro c y la coronación del perfil. Esta nueva forma del perfil lleva asociada 3 nuevos parámetros a considerar: j, k y  $\delta$ . Como se ha comentado, este plano se ha propuesto a fin de reducir sección y anchura, siempre y cuando se planteen ángulos  $\delta$  mayores que  $\beta$ . En principio, este planteamiento incide de forma negativa al valor ASI, ya que se aumenta el grado de inclinación del tramo c + k, pero dependiendo de la longitud de k en el momento del choque, puede tener una incidencia nula al no tener contacto alguno en el instante del máximo ASI.

Para mostrar este razonamiento, en la Tabla 3.9 se muestra el impacto del vehículo con la barrera en el instante de máximo ASI de los dos ensayos de impacto sobre el perfil 51.


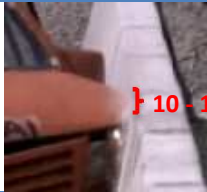


Instantáneas del máximo ASI de los dos ensayos de impacto del perfil 51			
			
a) Instante (49 ms) máximo ASI ensayo 06/09/2012.	b) Detalle de la imagen de la Tabla 3.9.a.		
			
c) Instante (50 ms) máximo ASI ensayo 27/09/2012.	d) Detalle de la imagen de la Tabla 3.9.c.		

Tabla 3.9. Instantáneas del máximo ASI de los ensayos de impacto del perfil 51.

En ella, hay un pequeño tramo de entre 10 y 15 cm en el que la barrera no tiene incidencia alguna sobre el máximo ASI porque no existe ningún contacto entre vehículo y perfil hasta este momento. Por tanto, los valores de  $k$  mínimos a proponer deberán ser  $k \geq 100 - 150$  mm. Hay que tener en cuenta que esta zona de no contacto con el instante ASI máximo dependerá de los parámetros que se tomen en la parte inferior.

#### Desarrollo de los resultados de las propuestas

En este apartado se presenta el análisis y evolución de los resultados de las distintas propuestas de perfiles numerados entre el 57 y el 74. En esta segunda fase de propuestas se han simulado un total de 18 perfiles repartidos en 7 series. Los perfiles propuestos son numerados del 57 al 74. El salto producido del 52 al 57, entre la primera y segunda fase de propuestas, corresponde a los perfiles que llevan asociados pequeños salientes en forma de dientes para aumentar la rugosidad de la barrera y ver si tiene un comportamiento satisfactorio para el vehículo.

En la Tabla 3.10 se presenta la distribución de las series y los objetivos que se persiguen en cada una. Acto seguido, se presenta el análisis y la evolución de resultados de cada una de las propuestas y series.

Serie	Número de propuestas	Numeración de los perfiles	Objetivo de la serie
9	6	57 - 62	Aumento de la zona de transición del plinto y añadido de un cuarto plano
10	4	63 - 66	Incidencia al variar el ángulo $\alpha$ y el parámetro $b$
11	5	67 - 71	Tendencia del ASI respecto a los ángulos de inclinación del plinto $\alpha$ y $\gamma$
12	1	72	Propuesta de 5 planos en base al perfil 44
13	2	73 - 74	Optimización de anchura y sección del perfil 72

*Tabla 3.10. Distribución de las series y de los objetivos de los perfiles del 57 al 74.*

#### 9ª Serie: Aumento de la zona de transición del plinto y añadido de un cuarto plano

La novena Serie de propuestas está compuesta por un total de 6 perfiles. El objetivo que se marca en esta Serie es valorar el efecto que tiene de aumentar la zona de transición del plinto, aumentando el parámetro  $b$ , con el objetivo de distanciar los dos planos correspondientes a los parámetros  $a$  y  $c$ . En la Tabla 3.11 se presentan los datos geométricos de los perfiles propuestos y sus resultados en los ensayos simulados, además del perfil 51 de referencia en esta Serie.

En dicha tabla se aprecia que en los perfiles del 59 al 61, se impone un parámetro  $k$  de valor 400 mm en lugar del recomendado entre 100 - 150 mm. Se toma este valor, ya que es el

correspondiente al medido in situ en la marca de rozamiento dejado por el coche sobre la barrera en su parte inicial del impacto. Además, hay que tener en cuenta que la parte más rígida de la carrocería es el larguero del vehículo, situado a 480 mm de tierra y que se encuentra aproximadamente a unos 30 cm de la parte superior del capó.

	Referencia	9ª Serie					
	51	57	58	59	60	61	62
a (mm)	200	200	200	200	200	200	200
b (mm)	80	63	98	104	126,9	152	145
c (mm)	620	637	602	196	173,1	148	555
k (mm)	-	-	-	400	400	400	-
d (mm)	900	900	900	900	900	900	900
e (mm)	150	150	150	150	150	150	150
f (mm)	109,3	135,4	128,0	41,7	36,8	31,5	38,8
g (mm)	114	109,1	116,8	180,1	181,2	181,2	207,1
h (mm)	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1
j (mm)	-	-	-	28,0	28,0	28,0	-
i (mm)	653,4	695,3	695,7	705,8	698,2	687,4	698,0
$\alpha$ (deg)	82	82	82	82	82	82	82
$\gamma$ (deg)	35	30	40	30	35	40	35
$\beta$ (deg)	78	78	78	78	78	78	86
$\delta$ (deg)	-	-	-	86	86	86	-
Área (m <sup>2</sup> )	0,351	0,349	0,352	0,304	0,306	0,307	0,302
ASI	1,63	1,71	1,65	1,54	1,48	1,50	1,49

Tabla 3.11. Resultados de las simulaciones 57 - 62.

En los perfiles 59 - 62 se obtienen valores de ASI entre 1,54 y 1,48 con secciones entre 0,302 y 0,307 m<sup>2</sup>. Estos perfiles, a pesar de no conseguir el ASI requerido, representan una gran mejora ya que, además de disminuir el ASI, se obtienen unas secciones muy inferiores a las propuestas hasta este momento. Las secciones son inferiores al perfil CSB representando un ahorro de material entre un 3,5 y 5%. Respecto a los perfiles F y NJ, los perfiles 59 - 62 representan un aumento de sección de entre un 16 y un 22 % respectivamente. En todos los perfiles de esta Serie, el ancho total se encuentra entorno a los 700 mm.

Analizando los perfiles 59, 60 y 61, entre ellos sólo varían los parámetros b y  $\gamma$ , dejando fijo el parámetro g. Así que, a mayor ángulo  $\gamma$ , se tiene mayor b. Esta afirmación se traduce en un efecto beneficioso al aumentar el parámetro b, y a la vez resulta negativo porque se aumenta el ángulo  $\gamma$ . Por tanto, no se puede juzgar qué valores de b y/o  $\gamma$  son más convenientes. Respecto al parámetro k, se recomienda, para posteriores series, proponer k inferiores a 400 mm para comprobar hasta qué punto disminuye el ASI. Teniendo en cuenta que el plano que le corresponde al parámetro k tiene poca incidencia en el valor máximo del ASI, se pueden plantear ángulos  $\delta = 89^\circ$  para disminuir al máximo la anchura y la sección.

El buen resultado del perfil 62 plantea nuevas alternativas para proponer ángulos  $\gamma$  entre  $30^\circ$  y  $35^\circ$ ; y  $\beta < 86^\circ$ , manteniendo los otros parámetros iguales. En los perfiles 57 y 58, los resultados de ASI no son satisfactorios y dejan constancia, comparando con el perfil 51, de la importancia de proponer  $b \geq 100$  mm con valores de  $\gamma \leq 35^\circ$ . Como conclusión de esta novena tanda de propuestas se determina que el perfil a definir deberá ser el dictado en la Tabla 3.12.

Parámetros	Comentarios
$a = 200$ mm	Parece ser que el valor óptimo se encuentra entre 190 y 200 mm
$b \geq 120$ mm	Con $b \geq 100$ mm también se obtienen buenos resultados
$100 - 150 \leq k \leq 400$ mm	Mejor valores próximos de 100 a 150 mm
$\alpha \geq 80^\circ$	Poca incidencia en el ASI
$\beta \leq 78^\circ$	Restricción de difícil cumplimiento debido al consumo de sección
$35^\circ \geq \gamma \geq 30^\circ$	Valor que también dependerá del parámetro b
$\delta = 89^\circ$	Valor de ángulo máximo para disminuir anchura y sección

Tabla 3.12. Conclusiones después de la 9ª Serie.

#### 10ª Serie: Incidencia al variar el ángulo $\alpha$ y el parámetro b

Para la décima Serie de propuestas se definen un total de 4 perfiles, numerados del 63 al 66 (ver Tabla 3.13). En esta Serie, las propuestas se basan en el perfil 62. Por una parte, se quiere analizar la incidencia de variar el ángulo  $\alpha$  manteniendo los otros parámetros iguales ya que, parece ser que tiene poca importancia de cara a los resultados de los ASIs obtenidos. Por otra parte, se rebaja el parámetro b hasta valores de 120 y 130 mm para disminuir el ancho total del perfil con la idea de construir una sección menor.

En la Tabla 3.13 se observa que los valores de ASI son mayores comparados con el del perfil 62 de referencia en esta Serie y, por tanto, no cumplen para una barrera de clase B. En principio, estos resultados desfavorables eran de esperar, puesto que se ha reducido la zona de transición correspondiente al parámetro b. En cambio, la reducción de sección es apreciable con valores entre el 5 y el 10%.

Para comprobar si el parámetro  $\alpha$  influye en el resultado del ASI, se han planteado dos pares de perfiles donde la única modificación entre ellos es la variación de  $\alpha$  de  $82^\circ$  a  $86^\circ$ . Entre los perfiles 63 y 64 el valor ASI registrado ha sido el mismo, por lo que se deduce que, en este caso,  $\alpha$  no ha influido tal y como se esperaba. Sin embargo, esta afirmación se ha puesto en entredicho después de los resultados obtenidos con el par de perfiles 65 y 66. El perfil 65 con  $\alpha = 82^\circ$  tiene un ASI = 1,66, pero el perfil 66 con  $\alpha = 86^\circ$  tiene un ASI = 1,73. Entonces, en este caso sí que ha influido el ángulo  $\alpha$  y de manera muy apreciable.

	Referencia	10ª Serie			
	62	63	64	65	66
a (mm)	200	200	200	200	200
b (mm)	145	130	130	120	120
c (mm)	555	570	570	580	580
k (mm)	-	-	-	-	-
d (mm)	900	900	900	900	900
e (mm)	150	150	150	150	150
f (mm)	38,8	39,9	39,9	40,6	40,6
g (mm)	207,1	185,7	185,7	171,4	171,4
h (mm)	28,1	28,1	14,0	28,1	14,0
j (mm)	-	-	-	-	-
i (mm)	<b>698,0</b>	<b>657,3</b>	<b>629,0</b>	<b>630,1</b>	<b>601,8</b>
$\alpha$ (deg)	82	82	86	82	86
$\gamma$ (deg)	35	35	35	35	35
$\beta$ (deg)	86	86	86	86	86
$\delta$ (deg)	-	-	-	-	-
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,302</b>	<b>0,288</b>	<b>0,285</b>	<b>0,279</b>	<b>0,276</b>
ASI	<b>1,49</b>	<b>1,63</b>	<b>1,63</b>	<b>1,66</b>	<b>1,73</b>

Tabla 3.13. Resultados de las simulaciones 62 - 66.

En la Tabla 3.14, se presentan las 4 instantáneas de las simulaciones de los perfiles 63 a 66 en el momento de ASI máximo con el objetivo de visualizar el comportamiento del vehículo durante el choque para ver alguna acción anómala especialmente en el perfil 66.

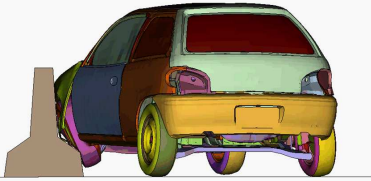
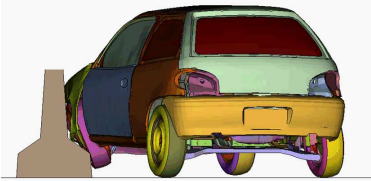
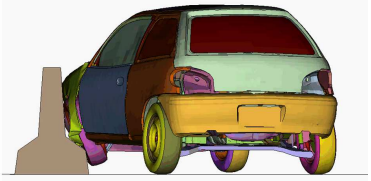

Instantáneas de las simulaciones de los perfiles 63 - 66	
	
e) Perfil 63, t = 65 ms. (Tiempo ASI máximo = 65 ms)	f) Perfil 64, t = 63 ms. (Tiempo ASI máximo = 63 ms)
	
g) Perfil 65, t = 64 ms. (Tiempo ASI máximo = 64 ms)	h) Perfil 66, t = 64 ms. (Tiempo ASI máximo = 64 ms)

Tabla 3.14. Instantáneas a los 65 ms de los perfiles 63-66 simulados.

Se aprecia que, para los perfiles 63 y 64, las imágenes son idénticas. La rueda y la carrocería del vehículo se deforman de igual manera e incluso la altura de la rueda respecto al suelo es la misma. Este comportamiento era de esperar ya que tienen el mismo valor ASI. Respecto a los perfiles 65 y 66, sí se aprecian pequeñas diferencias de comportamiento del coche. En el perfil 65, la llanta de la rueda no se visualiza porque la rueda está totalmente girada alineándose en paralelo sobre el plinto del perfil. Además, la carrocería sufre una mayor deformación a causa del giro de la rueda. En cambio, en la rueda del perfil 66 sí que se visualiza la parte interior perteneciente a la llanta de la rueda con una menor deformación de la carrocería de ese mismo lado. En ambos casos, la altura de la rueda es prácticamente la misma.

Los perfiles 63, 64 y 66 tienen una imagen del vehículo idéntica mientras que el 65 varía con las pequeñas diferencias referentes a la rueda y a su deformación. Por tanto, en contra de lo que era de esperar, el perfil 66, con el ASI más desfavorable de la Serie tiene un comportamiento idéntico a los perfiles 63 y 64.

Así que, visto el comportamiento del vehículo y de la incidencia del ángulo  $\alpha$  en los perfiles estudiados, no se puede concluir que el parámetro  $\alpha$  no influye en el valor del ASI. Para ser cautos, se propondrán valores de  $\alpha \geq 80^\circ$ , considerando la posibilidad de aumentarlo cuando se consiga una propuesta de perfil realmente competitiva.

Como conclusión de esta décima tanda de propuestas se determina que el perfil tipo a definir deberá cumplir con las recomendaciones de la Tabla 3.15:

Parámetros	Comentarios
$a = 200 \text{ mm}$	Parece ser que el valor óptimo se encuentra entre 190 y 200 mm
$b \geq 120 \text{ mm}$	Con $b \geq 100 \text{ mm}$ también se obtienen buenos resultados
$100 - 150 \leq k \leq 400 \text{ mm}$	Mejor valores próximos de 100 a 150 mm
$\alpha \geq 80^\circ$	Con un perfil competitivo, proponer valores mayores siempre y cuando no influya en el valor ASI
$\beta \leq 78^\circ$	Restricción de difícil cumplimiento debido al consumo de sección
$35^\circ \geq \gamma \geq 30^\circ$	Valor que también dependerá del parámetro b
$\delta = 89^\circ$	Valor de ángulo máximo para disminuir anchura y sección

Tabla 3.15. Conclusiones después de la 10ª Serie.

#### 11ª Serie: Tendencia del ASI respecto a los ángulos de inclinación del plinto $\alpha$ y $\gamma$

Para la undécima Serie de propuestas se definen un total de 5 perfiles, numerados del 67 al 71 (ver Tabla 3.16). El perfil 67 se basa en la barrera 60 con la única modificación del ángulo  $\alpha$  a  $86^\circ$  en vez de  $82^\circ$ . Con esta cambio se quiere saber si el ángulo  $\alpha$  tiene incidencia en los resultados ASI en esta propuesta y saber si se produce alguna variación remarcable. El perfil 68 es una propuesta casi idéntica al 67 con un aumento de 3 mm en el parámetro b y disminuyendo

estos 3 mm al parámetro  $c$  para ver si se reduce el ASI. El perfil 69 es una variación del 68, con un aumento de 50 mm del parámetro  $c$  y disminuyendo 50 mm del parámetro  $k$ , además de un aumento de  $2^\circ$  del ángulo  $\beta$  con el objetivo de poder obtener un valor ASI mejor. Los perfiles 70 y 71, junto con el perfil 60, son iguales con la única modificación del ángulo  $\gamma$  para saber si hay un valor óptimo ASI entre los  $34^\circ$  y  $36^\circ$ .

De los resultados presentados en la Tabla 3.16 muestran que para el perfil 67 la variación de aumentar  $4^\circ$  el ángulo  $\alpha$  de  $82^\circ$  a  $86^\circ$  respecto al perfil 60, implica un aumento de ASI de +0,06. Por lo tanto en este caso, el ángulo  $\alpha$  sí que tiene incidencia. El leve aumento del parámetro  $b$  de 3 mm en el perfil 68 respecto al 67, se traduce en una reducción del ASI de 0,03. Así que, se deberá tener en cuenta la importancia de  $b$  para posteriores propuestas siempre teniendo en mente el valor de  $\gamma$ . Las modificaciones propuestas para el perfil 69 respecto al 67 repercute en una variación nula del ASI.

	11ª Serie				
	67	68	69	70	71
a (mm)	200	200	200	200	200
b (mm)	127	130	130	127	127
c (mm)	173	170	220	173	173
k (mm)	400	400	350	400	400
d (mm)	900	900	900	900	900
e (mm)	150	150	150	150	150
f (mm)	36,8	36,1	38,8	36,8	36,8
g (mm)	181,4	185,7	185,7	174,8	188,3
h (mm)	14,0	14,0	14,0	28,1	28,1
j (mm)	28,0	28,0	24,5	28,0	28,0
i (mm)	670,2	677,5	675,8	685,3	712,3
$\alpha$ (deg)	86	86	86	82	82
$\gamma$ (des)	35	35	35	36	34
$\beta$ (deg)	78	78	80	78	78
$\delta$ (des)	86	86	86	86	86
Área (m <sup>2</sup> )	0,303	0,305	0,306	0,302	0,309
ASI	1,54	1,51	1,54	1,49	1,5

Tabla 3.16. Resultados de las simulaciones 67-71.

Los resultados ASI de los perfiles propuestos 70 y 71 junto con el 60, han determinado que para valores de  $b = 127$  mm, el valor óptimo de  $\gamma = 35^\circ$  con un ASI = 1,48 del perfil 60. En la gráfica siguiente de la Figura 3.10 se puede ver el valor óptimo de los tres perfiles.

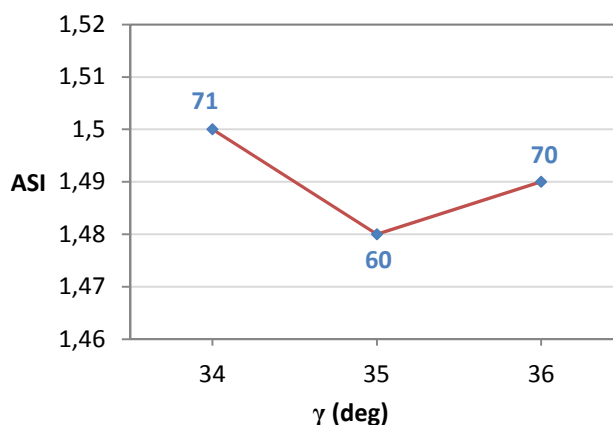


Figura 3.10. Influencia del parámetro  $\gamma$  en el ASI.

Como conclusión de esta undécima tanda de propuestas se determina que el perfil tipo a definir deberá cumplir con lo prescrito en la Tabla 3.17:

Parámetros	Comentarios
$a = 200$ mm	Parece ser que el valor óptimo se encuentra entre 190 y 200 mm
$b \geq 120$ mm	Con $b \geq 100$ mm también se obtienen buenos resultados
$100 - 150 \leq k \leq 400$ mm	Mejor valores próximos de 100 a 150 mm
$\alpha \geq 80^\circ$	Con un perfil competitivo, proponer valores mayores siempre y cuando no influya en el valor ASI
$\beta \leq 78^\circ$	Restricción de difícil cumplimiento debido al consumo de sección
$35^\circ \geq \gamma \geq 30^\circ$	Parece ser que el valor óptimo es para $\gamma = 35^\circ$ teniendo en cuenta el valor de b
$\delta = 89^\circ$	Valor de ángulo máximo para disminuir anchura y sección

Tabla 3.17. Conclusiones después de la 11ª Serie.

#### 12ª Serie: Propuesta de 5 planos en base al perfil 44

Con el análisis realizado de los 54 perfiles simulados (perfil vertical, series 1-22, 35-52 y 57-71), sólo el perfil 44 obtuvo un ASI inferior a 1,4 (ASI = 1,32). Este perfil se rechazó por tener demasiada sección ( $0,374$  m<sup>2</sup>) superior en un 18% al perfil CSB y por su amplia anchura de casi 80 cm (798,5 mm). A posterior de este perfil, se han planteado otros perfiles a fin de minorar estos dos condicionantes, pero los resultados obtenidos se estancan a un ASI  $\approx 1,5$ . A fin de poder conseguir el objetivo mínimo de un perfil de clase B (ASI  $\leq 1,4$ ), se plantea proponer una variación del perfil 44.

La propuesta que se presenta a continuación se basa en disminuir al máximo el volumen de hormigón en las zonas donde la barrera no actúa durante el impacto del vehículo con el perfil.



Se ha visualizado que durante el instante del ASI máximo en los 2 ensayos realizados con el perfil 51 en el pasado mes de septiembre de 2012, no hay contacto alguno del vehículo con la barrera en la parte superior (ver Tabla 3.9). Por tanto, esta zona de no contacto de aproximadamente entre 10 y 15 cm, se puede imponer un ángulo de  $89^\circ$  para reducir al máximo la sección y la anchura del perfil sin afectar el valor ASI máximo.

Por la parte inferior de la barrera, en los ensayos realizados con el perfil 51 en IDIADA en el mes de septiembre de 2012, se visualizó que el impacto de la llanta de la rueda con el perfil se produce en el extremo superior del plinto, entre los 15 y 20 cm respecto al nivel del suelo (ver Figura 3.11). Por debajo, solo se observa las marcas del neumático e incluso en los primeros centímetros a ras de suelo no se produce ningún contacto.

Se aprecia en la Figura 3.11, en la zona de detalle delimitada, los restos arrancados de hormigón del perfil producido por el contacto de la llanta. Así que, se puede proponer que en los primeros 15 cm respecto del nivel suelo, un ángulo de  $89^\circ$  y luego entre los 15 y 20 cm un ángulo de  $80^\circ$  afin al perfil 44. De esta manera, la zona que tiene una incidencia nula o casi nula del impacto de la rueda contra el plinto se impone un plano vertical y la zona restante se impone un ángulo de plano más óptimo. Así, se tendrá una forma del perfil con 5 planos de inclinación tal y como se observa en la Figura 3.12, donde se detalla la nomenclatura utilizada para cada uno de los parámetros geométricos.

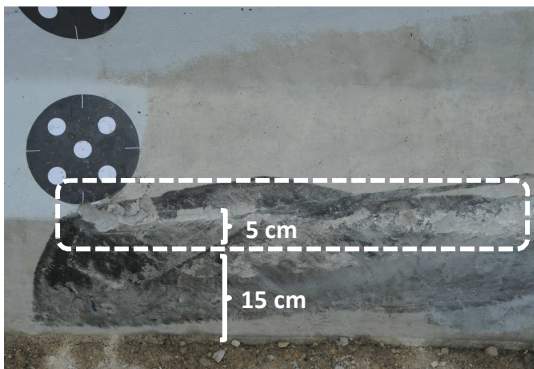


Figura 3.11. Detalle zona de impacto de la llanta con el perfil (2º ensayo, perfil 51).

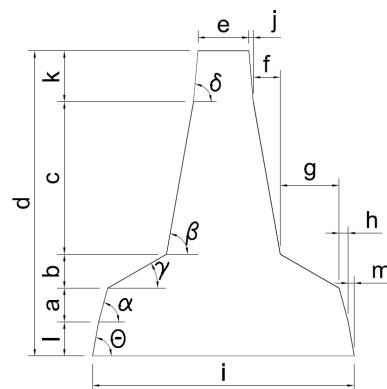
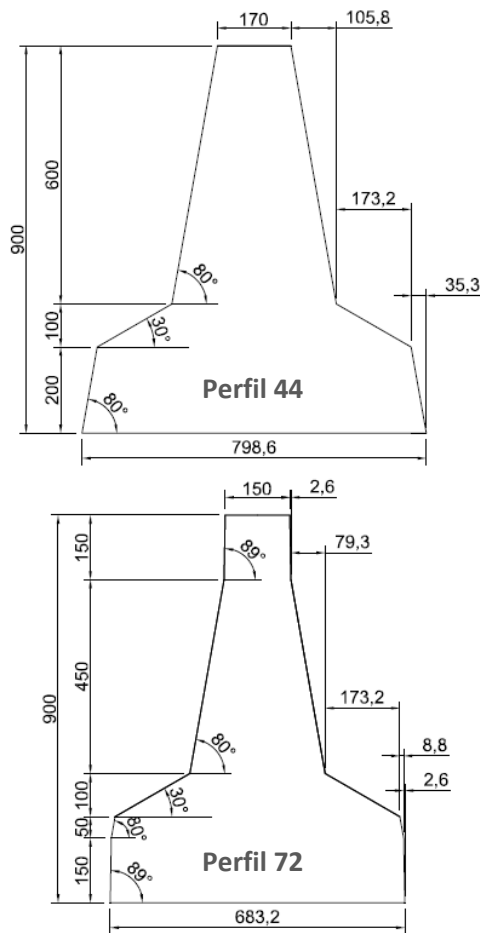


Figura 3.12. Parámetros del perfil con 5 planos.

En la Figura 3.13 se presentan los dibujos de los perfiles 44 y 72 y las características geométricas de ambos en la Tabla 3.18. Con estas medidas correctoras el perfil 72 tiene una sección de  $0,313 \text{ m}^2$  y una anchura de 68,3 cm. Observando dicha tabla, los resultados del ensayo de la simulación numérica realizada para el perfil 72 obtuvieron un  $\text{ASI} = 1,41$ . De acuerdo con la normativa actual, redondeando el resultado a la precisión de una décima se tiene un  $\text{ASI} = 1,4$ . Por tanto, este perfil cumple la denominación clase B. Con una sección total de  $0,313 \text{ m}^2$  y una anchura total de 683,2 mm; es un perfil a tener en cuenta para posteriores propuestas.



	Referencia	12ª Serie
	44	72
a (mm)	200	50
b (mm)	100	100
c (mm)	600	450
k (mm)	-	150
l (mm)	-	150
d (mm)	900	900
e (mm)	170	150
f (mm)	105,8	79,4
g (mm)	173,2	173,2
h (mm)	35,3	8,8
i (mm)	798,5	683,2
j (mm)	-	2,6
m (mm)	-	2,6
$\alpha$ (deg)	80	80
$\gamma$ (deg)	30	30
$\beta$ (deg)	80	80
$\delta$ (deg)	89	89
$\theta$ (deg)	-	89
Área (m <sup>2</sup> )	0,374	0,313
ASI	1,32	1,41

Figura 3.13. Perfiles 44 y 72. Cotas en mm.

Tabla 3.18. Resultados de la simulación 72.

Como bien se sabe, el perfil 72 está basado al perfil 44 con las modificaciones pertinentes para que el resultado final del ASI (ASI = 1,32 del perfil 44) no se viera afectado. Esta condición se ha cumplido en parte, pero el comportamiento del vehículo entre los ensayos de los perfiles 44 y 72 difieren de forma moderada.

En la Figura 3.14 se muestra el índice ASI a lo largo del tiempo de choque de los dos perfiles simulados. En ella, se puede ver que en el perfil 44, el pico máximo del ASI se mantiene durante más tiempo con una subida y bajada más moderada, es decir, los valores de máximos en el primer pico se prolongan durante más tiempo. En cambio, el pico máximo ASI del perfil 72 es más puntiagudo, con una subida y bajada del ASI más marcadas. En los dos casos, el instante de tiempo donde se consigue el máximo es muy parecido; en el perfil 44 se produce en  $t = 0,044$  s y en el perfil 72 es en  $t = 0,0447$  s.

A priori, se esperaba que la evolución del ASI de los dos perfiles fueran idénticos, condición que no se cumple. Analizando detenidamente la razón de este resultado, se han visualizado las diferentes fases de contacto entre el vehículo y la barrera, centrándose en los cambios introducidos del perfil 72 respecto del 44. Una primera modificación realizada en el plinto es donde se produce el contacto de la rueda con el perfil y una segunda modificación es

la introducción de un plano vertical en la parte superior del perfil cuya zona en el instante de ASI máximo no tiene incidencia alguna.

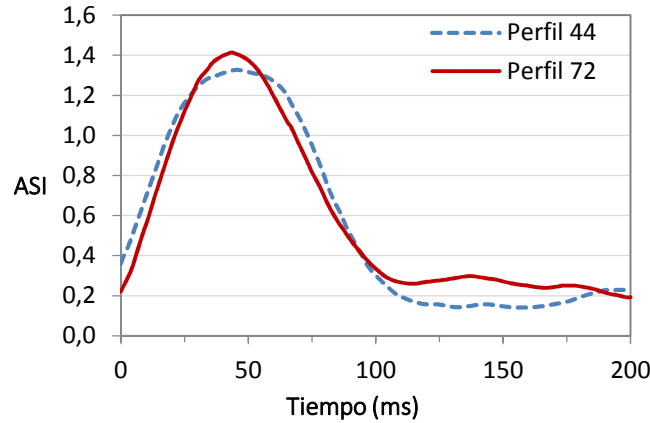


Figura 3.14. Gráfica ASI de los perfiles simulados 44 y 72.

La primera modificación del plinto se hizo con el afán de que el impacto de la parte metálica de la rueda con el perfil se producía entre los 150 y 200 mm desde el nivel del suelo. Esta afirmación es cierta, pero se obvió de la importancia de la superficie de contacto de toda la rueda (tanto la parte metálica como el neumático) existente durante el impacto. Cuanto mayor sea la superficie de contacto, mayor será la fuerza de rozamiento y menor fuerza de impacto será el choque (después de la rotura del eje de la rueda) del vehículo contra la parte superior del perfil.

El desarrollo del choque se puede ver en las instantáneas de la Tabla 3.19.

Instantáneas de las simulaciones de los perfiles 44 y 72	
a) Perfil 72. Contacto rueda con el plinto. (t = 10ms)	b) Perfil 72. Contacto rueda con el plinto. (t = 20ms)
c) Perfil 44, t = 45 ms. (Tiempo ASI máximo)	d) Perfil 72, t = 44 ms. (Tiempo ASI máximo)

Tabla 3.19. Instantáneas de las simulaciones de los perfiles 44 y 72.

En la citada tabla, en las imágenes a) y b) se puede ver que la altura de contacto de la rueda con el perfil 72 a nivel del suelo es de unos 100 mm en el instante inicial de contacto ( $t = 10$  ms). Pero en el instante  $t = 20$  ms, se visualiza un contacto de la rueda con el plinto a unos 85 mm del suelo. De este modo, el plano de  $89^\circ$  de 15 cm de la base, afecta al comportamiento del vehículo.

La segunda modificación realizada en la parte superior del perfil se hizo con el objetivo de que no repercutía para nada en el resultado del ASI máximo, ya que no existe contacto del coche con el perfil. Esta afirmación es cierta y se puede ver en las imágenes c) y d) de la Tabla 3.19 en el instante donde se registra el ASI máximo. Se puede ver que no existe contacto del vehículo en unos 200 mm respecto a la cota de coronación del perfil, en vez de los 150 mm planteados. En el caso de la simulación del perfil 44 en el instante del ASI máximo, también existen unos 200 mm donde no se produce ningún contacto.

Vistos los resultados obtenidos, la propuesta 72 es competitiva manteniendo una sección y anchura total razonables y con un nivel de seguridad de clase B. Se debe tener en cuenta que el objetivo inicial de la propuesta 72 era obtener un comportamiento del vehículo idéntico al perfil 44 con una ASI  $\approx 1,32$ . Para conseguir este objetivo, se recomienda para posteriores propuestas, un perfil con un valor  $k = 200$  mm y un valor  $l \leq 100$  mm.

#### *13ª Serie: Optimización de anchura y sección del perfil 72*

En base a las conclusiones del perfil 72, se proponen dos perfiles: el 73 y el 74 con unos valores de  $k = 200$  mm y  $l = 100$  mm. Además, se ha añadido la modificación de los ángulos  $\theta$  y  $\delta$  a  $87^\circ$ , en vez de los  $89^\circ$ , por razones constructivas. Por tanto, para posteriores propuestas el mayor ángulo posible para su construcción será de  $87^\circ$ .

En la Tabla 3.20 se puede ver los datos de los parámetros geométricos y el valor ASI máximo registrado.

	13ª Serie			13ª Serie	
	73	74		73	74
a (mm)	100	100	i (mm)	704,2	643,4
b (mm)	100	100	j (mm)	10,5	10,5
c (mm)	400	400	m (mm)	5,2	5,2
k (mm)	200	200	$\alpha$ (deg)	80	80
l (mm)	100	100	$\gamma$ (deg)	30	35
d (mm)	900	900	$\beta$ (deg)	80	80
e (mm)	150	150	$\delta$ (deg)	87	87
f (mm)	70,5	70,5	$\theta$ (deg)	87	87
g (mm)	173,2	142,8	Área (m <sup>2</sup> )	0,315	0,3
h (mm)	17,6	17,6	ASI	1,38	1,56

Tabla 3.20. Resultados de las simulaciones de las propuestas 73 y 74.

En la misma se observa que para el perfil 73 se aumenta de forma moderada la anchura y la sección respecto al perfil 72. Para este perfil se tiene una anchura total de 704,2 mm (683,2 mm del perfil 72) que representan unos 10 cm por encima del valor deseable de 60 cm, pero sigue en sintonía el intervalo de 600 - 700 mm planteados en las últimas propuestas. La sección de esta barrera también es competitiva con un valor de 0,315 m<sup>2</sup> (0,313 m<sup>2</sup> del perfil 72) casi igual que el perfil CSB que tiene 0,318 m<sup>2</sup>. Con estas modificaciones introducidas, a priori se esperaba obtener un ASI muy parecido al perfil 44 (ASI = 1,32).

Por lo que al perfil 74 se refiere, tiene la diferencia añadida respecto al perfil 73 de tener un mayor ángulo  $\gamma$  (35°) y un menor longitud del parámetro g asociado. Con estos retoques se reduce la anchura total de forma apreciable hasta 643,4 mm, valor más cercano a los 60 cm deseados, y una sección más baja de 0,300 m<sup>2</sup> que representa una reducción del 6 % respecto al perfil CSB.

Otra consideración que se ha tenido en mente para estas propuestas, es el aumento introducido del parámetro a hasta los 100 mm con un ángulo de 80°. Esta modificación puede hacer pensar que el vehículo tenga más facilidad de subida y por tanto llegue a afectar a la zona del parámetro k durante el instante del ASI máximo. Esta afirmación razonable se desmiente con la instantánea del ASI máximo del perfil 44 de la Tabla 3.19.c. Donde ya se observó que se mantienen en unos 200 mm la zona donde no existe contacto del vehículo con el perfil, así que las dos propuestas con el valor  $k = 200$  mm son acertadas.

Analizando los índices de severidad de impacto, los resultados de la simulación de estas dos propuestas han sido dispares. Por el lado positivo, con el **perfil 73**, se ha alcanzado un **ASI = 1,38**, mientras que el perfil 74 ha dado un ASI = 1,56; valor claramente por encima del 1,4 y del perfil 73. Por lo tanto, viendo los resultados se extrae que el **perfil 73 cumple con la condición de clase B**. La diferencia apreciada en el valor ASI entre los perfiles 73 y 74 de +0,18 del segundo respecto al primero, se debe al valor del ángulo  $\gamma$ . A razón de estos resultados, fijando el parámetro  $b = 100$  mm, el valor  $\gamma$  más óptimo es igual a 30°.

Con los resultados obtenidos hasta en este momento, el perfil 73 con un ASI = 1,38 < 1,4 y con una sección de 0,315 m<sup>2</sup> y una anchura total de 704,2 mm, es el escogido para realizar un ensayo real para poder corroborar el resultado de la simulación numérica.

### 3.3.4- Modificación del modelo inicial

#### Resultados generales

Hasta ahora, todos los perfiles ensayados numéricamente hasta el perfil 74 se han analizado conjuntamente, ya que son fruto de los resultados de un modelo numérico con alguna modificación de refinamiento del modelo usado. Este modelo numérico utilizado se ha dado como válido para analizar los resultados y proponer nuevos perfiles para ensayar; habiéndose comprobado que este modelo tiene similitudes con el comportamiento real del vehículo, donde

se ha contrastado este comportamiento con los ensayos reales hechos hasta este punto. Los valores de ASI del modelo numérico eran sobrestimados, por tanto, se han considerado que los valores ASI del modelo numérico están al lado de la seguridad.

En la Figura 3.15 se muestra la evolución de los valores ASI de todos los perfiles simulados. Se remarca que hay un salto en el número de los perfiles propuestos del 22 al 35, pendientes de, si es conveniente, proponer perfiles con salientes. En ella se visualiza la tendencia a la baja de los valores ASI a medida que se ha ido avanzando y proponiendo nuevos perfiles. Se observa de la mejoría de los resultados con valores ASI iniciales por encima de 2 hasta los valores ASI finales del alrededor de 1,5 o incluso en algunos casos por debajo de 1,4. Esta evolución ha ido estrechamente ligada con la optimización de la anchura total y sección de la barrera para que realmente sea competitiva para poderla usar como sistema de contención en carreteras.

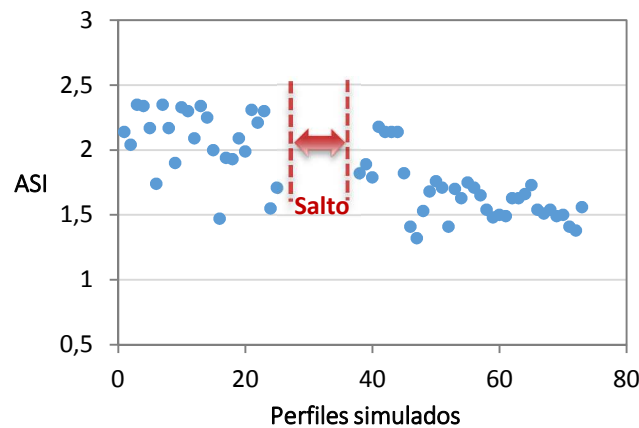


Figura 3.15. Evolución del valor ASI de las diferentes propuestas de perfil.

#### Contrastación y evolución del modelo numérico

Para contrastar los resultados del modelo simulado, se han realizado hasta al momento, 5 ensayos reales: 1 ensayo con la barrera Inicial, 3 con el perfil 51 (uno nulo) y 1 con el perfil 73. De los 2 ensayos de la barrera 51, se ha escogido el valor ASI del segundo ensayo para el análisis de los ensayos de los 3 perfiles.

En la Figura 3.16 se expone una gráfica de comparación de los valores ASI obtenidos entre los ensayos simulados y los ensayos reales. Se observa que en los ensayos de los perfiles Inicial y 51, los valores ASI simulados están por encima de los valores ASI reales, sobrestimando el valor real por encima de los 0,1 puntos ASI. Pero en cambio, esta tendencia se rompe con el ensayo del perfil 73.

En la citada figura, el ASI real del perfil 73 registra un valor claramente superior al simulado con una diferencia de más de 0,25 puntos ASI. Debido a este importante cambio de tendencia en el ASI de simulación se plantea cuál puede ser la razón del valor tan lejano previsto por el modelo de simulación. A raíz de este resultado, se realiza un análisis del programa numérico.

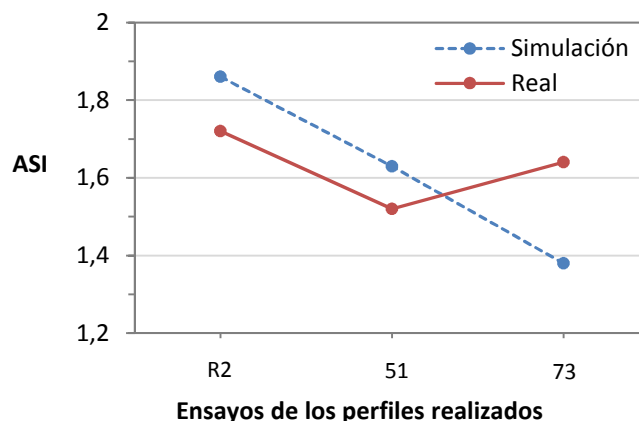


Figura 3.16. Comparación de los resultados ASI obtenidos en el modelo numérico y el real.

Después de revisar modelo numérico, se detecta que algunos de los parámetros y condiciones de contorno implementadas no se ajustan al comportamiento real experimentado por el vehículo. De este modo, se corrigen las deficiencias del modelo utilizado de modo que sea más afín a la realidad. Debido a estas modificaciones añadidas al programa, dan como resultado un comportamiento del vehículo y unos valores ASI algo diferentes a los obtenidos hasta al momento. Es decir, todos los resultados de los perfiles simulados (desde el perfil 1 hasta el perfil 74) pueden diferir de forma apreciable con el nuevo modelo. Por tanto, se debe tener mucho cuidado cuando se quiera comparar los resultados con el antiguo modelo. Por razones de tiempo y de carga de trabajo, no es posible simular todos los perfiles propuestos con el nuevo modelo, sólo se simulan los más importantes para poder continuar y mejorar el perfil de barrera.

#### Resultados del nuevo modelo numérico

Con el nuevo modelo numérico se ensayan algunos de los perfiles ya propuestos para poder contrastar los nuevos resultados y así verificar o modificar los valores de los distintos parámetros de la barrera.

En primer lugar, en la Figura 3.17 se presenta la comparación de resultados ASI de ensayos reales con los valores ASI del nuevo modelo de simulación y del modelo antiguo. En la misma se ve como en los resultados ASI del nuevo modelo se producen algunos cambios. En el caso del ensayo del perfil 51 el valor ASI prácticamente coincide con el registrado en el ensayo real. En cambio, en el ensayo del perfil Inicial hay una sobrestimación del valor ASI de 0,14 mientras que para el ensayo del perfil 73 hay una subestimación del valor ASI de 0,13. Por tanto, entre los valores ASI del nuevo modelo y el real no se ajusta a ningún patrón. Así que, para la proposición de nuevas barreras, se tendrá que tener cuenta que el valor ASI real seguramente será igual al ASI del modelo  $\pm 0,14$  de acuerdo con los resultados obtenidos hasta en este momento del estudio. Este nuevo intervalo mejora el modelo anterior, ya que el ASI de simulación con el resultado ASI real del perfil 73, representaba un ASI del modelo  $+0,25$  del valor real.

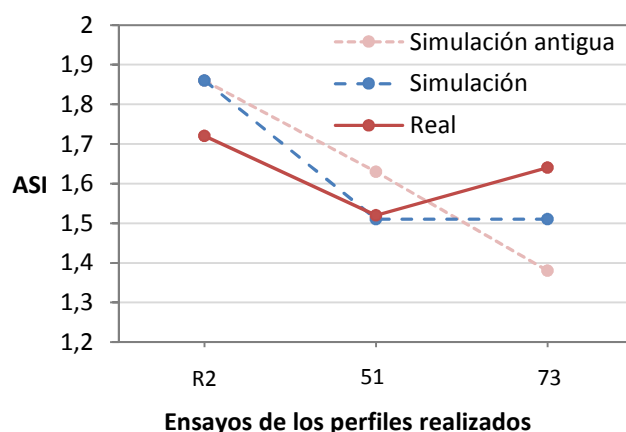


Figura 3.17. Comparación de los resultados ASI obtenidos en los 2 modelos numéricos y el real.

Con el nuevo modelo numérico se han realizado 11 simulaciones de varios perfiles ya propuestos. En primer lugar se ha ensayado los perfiles CSB e Inicial para ver si vuelven a darse valores ASI tan elevados por encima de 2. También se han ensayado los perfiles 3, 35, 36 y 37 para poder corroborar si el valor óptimo de  $a$  sigue siendo los 200 mm obtenidos del modelo anterior. Además se ha ensayado el perfil 44 por ser el perfil que obtuvo el valor ASI más bajo del modelo numérico anterior y el perfil 51 porque es el perfil que se escogió para realizar ensayos reales en septiembre de 2012. Por último, otro de los perfiles para contrastar con el valor obtenido de las simulaciones anteriores es el perfil 73. Los perfiles 75-78 son propuestos a posteriori del ensayo real del perfil 73 con el objetivo de evitar el vuelco del vehículo. El perfil 75' fue propuesto para comprobar la incidencia que tiene incluir un nuevo plano con ángulo de  $87^\circ$  en la base del plinto comparando con el perfil 73. Los perfiles de referencia New Jersey (R4) y F (R4) se incluyen en esta etapa ya que hasta ahora no se habían simulado. En las tablas Tabla 3.21 y Tabla 3.22 se muestran las características geométricas y el resultado ASI de cada perfil.

Observando los resultados de los valores ASI de las tablas Tabla 3.21 y Tabla 3.22 del nuevo modelo son claramente inferiores en los perfiles R1, R2, 3, 35 - 37, y 51, con disminuciones de 0,07 del perfil 3 hasta 0,26 del perfil 36. En cambio los perfiles 44 y 73 se produce todo lo contrario con aumentos de 0,17 del perfil 44 y 0,13 del perfil 73. Este comportamiento se aprecia que para valores de ASI entre 1,6 y 2,1 del modelo anterior, los valores ASI del nuevo modelo bajan; mientras que para valores de entre 1,3 y 1,4, los ASI del modelo nuevo aumentan.

Respecto al perfil R1, se observa que el valor de ASI del nuevo modelo sigue siendo muy elevado con un valor de 2,00. Este resultado vuelve a suscitar la doble duda de si la barrera inglesa realmente es una barrera de clase B o de si el modelo numérico se encuentra bastante alejado de la realidad. Por tanto, es de especial interés disipar estas dudas y proceder a un ensayo de impacto real para poder dar veracidad al valor obtenido por el modelo.

Para finalizar, los resultados ASI de los perfiles New Jersey y F dan valores de ASI al límite de la clase C con un valor ASI de acuerdo con la norma EN 1317 (2010) de 1,9. Por tanto, la forma de estos perfiles queda lejos de la forma deseada para obtener un  $ASI \leq 1,4$ .



	R1	R2	3	35	36	37	44	51
a (mm)	250	240	200	150	180	220	200	200
b (mm)	50	85	100	100	100	100	100	80
c (mm)	600	545	600	650	620	580	600	620
d (mm)	900	870	900	900	900	900	900	900
e (mm)	200	170	170	170	170	170	170	150
f (mm)	85	96	105,8	114,6	109,3	102,3	105,8	131,8
g (mm)	50	60	100	100	100	100	173,2	114,3
h (mm)	35	42,3	35,3	26,5	31,7	38,8	35,3	28,1
i (mm)	540	566	652,1	652,1	652,1	652,1	798,5	698,3
$\alpha$ (deg)	82	80	80	80	80	80	80	82
$\gamma$ (deg)	45	55	45	45	45	45	30	35
$\beta$ (deg)	82	80	80	80	80	80	80	78
Área (m <sup>2</sup> )	0,318	0,307	0,337	0,329	0,334	0,340	0,374	0,351
ASI	2,00	1,87	1,67	1,69	1,63	1,67	1,49	1,51
ASI ant.	2,14	2,04	1,74	1,82	1,89	1,79	1,32	1,63

Tabla 3.21. Resultados de las simulaciones de los perfiles CSB, Inicial, 3, 35 - 37, 44 y 51.

	73	75	76	77	78	75'	R4	R5
a (mm)	100	200	100	100	100	200	76	76
b (mm)	100	100	82,5	90	100	100	254	178
c (mm)	400	600	417,6	410	300	400	483	559
k (mm)	200	-	200	200	300	200	-	-
l (mm)	100	-	100	100	100	-	-	-
d (mm)	900	900	900	900	900	900	813	813
e (mm)	150	170	150	150	150	170	152,9	244
f (mm)	70,5	81,1	73,6	72,3	52,9	70,5	50,8	58,8
g (mm)	173,2	173,2	142,8	155,9	173,2	173,2	177,9	124,6
h (mm)	17,6	35,2	17,6	17,6	17,6	35,2	0,0	0,0
i (mm)	704,2	749,2	649,6	673,1	679,4	749,0	749,2	749,2
j (mm)	10,5	-	10,5	10,5	15,7	10,5	-	-
m (mm)	5,2	-	5,2	5,2	5,2	-	-	-
$\alpha$ (deg)	80	80	80	80	80	80	90	90
$\gamma$ (deg)	30	30	30	30	30	30	55	55
$\beta$ (deg)	80	82,3	80	80	80	80	84	84
$\delta$ (deg)	87	-	87	87	87	87	-	-
$\theta$ (deg)	87	-	87	87	87	-	-	-
Área (m <sup>2</sup> )	0,315	0,344	0,299	0,306	0,299	0,334	0,254	0,302
ASI	1,51	1,5	1,54	1,56	1,54	1,48	1,86	1,91
ASI ant.	1,38	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 3.22. Resultados de las simulaciones de los perfiles 73, 75 – 78, 75', R4 y R5.

A continuación, con estos nuevos resultados ASI se analizan cada uno de los parámetros del perfil para poder ver qué valores son más óptimos para obtener el menor ASI posible. También se deberá tener en cuenta las medidas de anchura y sección del perfil para hacerlo competitivo y evitar el efecto de vuelco que se produce con el perfil 73.

- Parámetro a

Con los resultados ASI de los perfiles 3, 35, 36 y 37; se ha dibujado una gráfica (Figura 3.18) donde se puede ver la tendencia que experimenta con los distintos valores de plinto propuestos. Se puede apreciar que en el nuevo modelo, se produce un ASI mínimo en  $a = 180$  mm con un valor de 1,63, frente al mínimo óptimo de 200 mm obtenido con el modelo anterior. Hay que tener en cuenta que la altura de plinto propuesto pertenece al parámetro a o el equivalente al decir la suma de los parámetros a y l, donde l es el plano que se ha añadido en algunos de los perfiles propuestos en la zona del plinto.

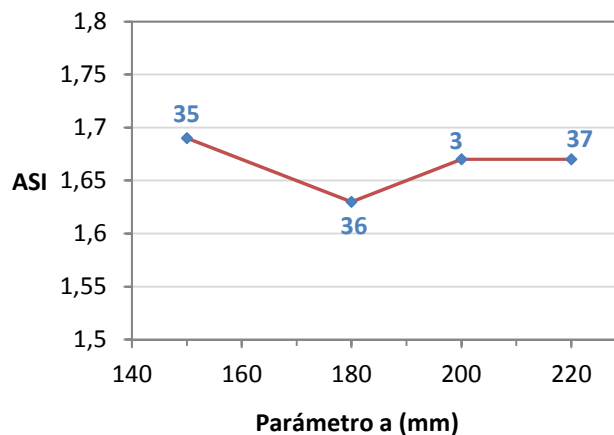


Figura 3.18. Influencia del parámetro a en el ASI.

Se quiere remarcar que este mínimo encontrado en la altura de plinto depende de la altura de la rueda, específicamente depende del contacto de la llanta de la rueda con el plinto. Con una altura óptima de plinto, permite una deformación más idónea de la rueda y de su eje, y a la vez, facilitar el remonte de la rueda sobre la barrera. Así que, esta altura variará según el tamaño de la rueda y también del tipo de vehículo.

- Parámetro b

Para el análisis del parámetro b se ha comparado los resultados de los perfiles 73, 76 y 77, que son las barreras que tiene las mismas medidas geométricas cambiando solamente los valores de b y de forma unívoca los valores del parámetro c.

En la Figura 3.19 se muestran los resultados de estos 3 perfiles ensayados; pudiéndose observar un valor ASI máximo en  $b = 90$  mm con un ASI = 1,56. En cambio el valor más bajo se registra en  $b = 100$  mm con un ASI = 1,51. Cabe a destacar la notable diferencia existente por la variación de aumentar 1 cm del parámetro b de 9 cm a 10 cm acompañado de un descenso de

ASI de -0,05 puntos. Es curioso ver que para  $b = 82,5$  mm, el ASI es ligeramente más bajo que para  $b = 90$  mm, cosa que parecería ser lo contrario, es decir, cuanto más grande sea  $b$ , más recorrido del vehículo sobre la barrera y menor ASI tal y como sucede para los valores de  $b$  iguales a 90 y 100 mm. Con los resultados obtenidos es recomendable que para posteriores perfiles se propongan valores de  $b \geq 100$  mm.

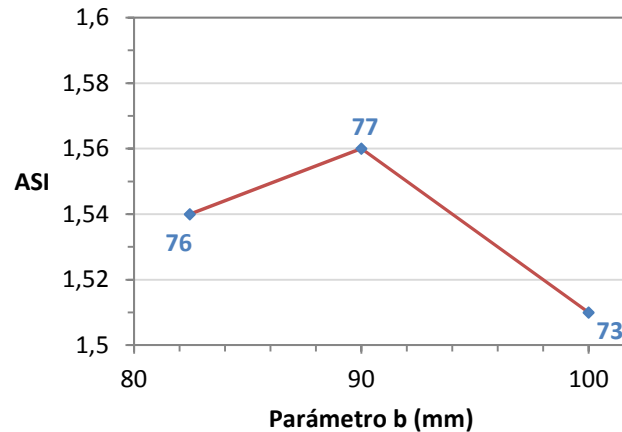


Figura 3.19. Influencia del parámetro b en el ASI.

- Parámetro c

Con los resultados ASI de los perfiles simulados no se puede establecer ninguna tendencia en que se pueda juzgar qué valor de  $c$  es más óptimo. En este mismo análisis se describirán los parámetros asociados a esta variable:  $\beta$  y  $f + g$ , donde sí se han podido acotar qué valores son más idóneos.

- Parámetro k

Para comprobar si con el nuevo modelo el parámetro  $k$  tiene incidencia en el valor ASI, se ha comparado los perfiles 44 y 75'. La única diferencia existente entre estas dos barreras es de la inclusión de un plano más inclinado de  $87^\circ$  en la parte superior del perfil llegando hasta la coronación. En este caso, el perfil 75' incluye este plano con un valor de  $k = 200$  mm. Es de esperar que al incluir un plano más vertical, el valor ASI sea igual o superior al perfil 44 pero con una incidencia muy baja, puesto que en el choque del vehículo contra la barrera no se produce un total contacto de la zona superior cuando se registra el ASI máximo.

Los resultados obtenidos dan un ASI igual a 1,49 para el perfil 44 y 1,48 para el perfil 75'. Así pues, en contra de lo supuesto, la simulación ha dado mejores resultados el perfil 75' en vez del 44. Es cierto que la diferencia es muy pequeña de solamente 1 centésima, por lo que se puede considerar que no hay variación del ASI con la introducción de este plano de  $87^\circ$  en la parte superior de coronación de 200 mm.

- Parámetro l

Esta variable pertenece a la inclusión de un nuevo plano en la zona del plinto. Es decir, en algunos perfiles la altura del plinto se compone de la suma de los parámetros  $a + l$ . Esta modificación se introduce con la idea de que en la zona del parámetro l se incluye un plano más inclinado porque se supone que es una zona donde se produce un menor contacto entre la rueda y el plinto. Esta variación se hace por motivos de disminuir anchura y sección de la barrera. En los perfiles simulados con el nuevo modelo, se puede comparar de la incidencia del parámetro l en los perfiles 73 y 75'; donde la única diferencia entre ellos radica en la inclusión o no de dos planos en el plinto. Es de esperar que para el perfil 75' dé un mejor resultado ASI ya que no incluye el parámetro l.

Los resultados obtenidos dan un ASI igual a 1,51 para el perfil 73 y 1,48 para el perfil 75'. Así que, la simulación ha dado mejores resultados el perfil 75' con una disminución de -0,03 puntos ASI. Este comportamiento era supuesto, ya que el perfil 73 presenta una mayor dificultad de subida de la rueda del coche debido a la fuerte inclinación del plano correspondiente al parámetro l de 87º seguido del parámetro  $a = 100$  mm con un ángulo menor de 80º para cubrir el plinto. Esta diferencia del ASI registrado es apreciable pero tampoco es demasiada, por lo que resultaría interesante ver qué comportamiento tiene el vehículo para valores mayores del parámetro l por encima de 100 mm con el objetivo de disminuir anchura y sección de barrera. Sería de interés ver qué incidencia tendría en una nueva propuesta de valores de  $l > 100$  mm, por ejemplo  $l = 150$  mm.

- Parámetro  $\alpha$

El ángulo  $\alpha$  se encuentra en el plano de inclinación del plinto, zona donde impacta la rueda del vehículo contra la barrera. Si se incluye un segundo plano en el plinto, el parámetro  $\alpha$  pertenecerá el de la parte superior del plinto, zona donde impacta la llanta de la rueda. Los mejores valores de ASI se dan para  $\alpha = 80^\circ$  tal y como se puede ver en las tablas anteriores Tabla 3.21 y Tabla 3.22 para los perfiles 44, 75 y 75'. Para poder bajar el valor ASI de estos perfiles se deberán proponer valores de  $\alpha < 80^\circ$ . Esta consideración de bajar el ángulo de inclinación, permitirá una mayor facilidad de remonte de la rueda del vehículo sobre la barrera, y por consiguiente, mayor peligrosidad de vuelco del coche. Se deberá tener especial cuidado con el vuelco que puede incidir en aumentar este parámetro, tal y como sucede con el perfil 73.

- Parámetro  $\theta$

El plano que corresponde al parámetro  $\theta$  pertenece a la zona donde tiene una menor incidencia en el choque entre la rueda y el plinto. Su inclusión sólo va precedida de la presencia de dos planos en el plinto. Por tanto, con el objetivo de disminuir anchura y sección de la barrera se impone el valor máximo posible para la ejecución de la barrera en obra de valor 87º.

- Parámetro  $\gamma$

Del parámetro  $\gamma$  se puede decir que para valores de  $\gamma = 45^\circ$  dan valores ASI por encima de 1,63. En cambio, para valores de  $\gamma$  entre de  $30^\circ$  y  $35^\circ$  los valores ASI son inferiores a 1,56. No se puede comparar de forma directa la incidencia de este parámetro entre perfiles porque presentan diversas medidas de parámetros distintas en cada par de perfiles.

Sólo se observa la excepción de la comparación entre los perfiles 3 y 44. En este caso, la única diferencia entre los dos perfiles es la variación del ángulo  $\gamma$  de  $30^\circ$  o  $45^\circ$ , variando el parámetro  $g$  de acuerdo al valor de ángulo asociado y manteniendo el parámetro fijo  $b$  en 100 mm. Para el perfil 3 con  $\gamma = 45^\circ$ , se obtiene un ASI = 1,67 mientras que para el perfil 44 con  $\gamma = 30^\circ$ , se obtiene un ASI = 1,49. Esta variación del  $15^\circ$  del ángulo  $\gamma$ , representa una diferencia de 0,18 puntos ASI en favor del ángulo menor. Por tanto, para posteriores propuestas se recomienda ángulos  $\gamma$  de alrededor de  $30^\circ$  o  $35^\circ$ . Puede resultar de interés proponer valores de  $\gamma$  por debajo de  $30^\circ$  para ver qué tendencia tiene el ASI.

- Parámetro  $\beta$

El parámetro  $\beta$  determina la mayor o menor facilidad de subida del vehículo sobre la barrera, además es la zona donde se produce el mayor impacto de la parte delantera del morro del coche contra el perfil. De este modo, es de esperar que para ángulos  $\beta$  más inclinados, mayor será la dificultad del vehículo de remontar sobre la barrera. Esta mayor dificultad de desplazamiento vertical del automóvil se traduce en un mayor impacto de la componente horizontal en dirección  $Y$  y se traduce con un valor ASI mayor.

De los perfiles simulados con el nuevo modelo se puede comparar los resultados obtenidos del par de perfiles de los números 44 y 75 donde el único parámetro que varía es el ángulo  $\beta$  de  $80^\circ$  a  $82,3^\circ$  respectivamente, manteniendo constante el parámetro  $c$  y variando el parámetro  $f$  asociado con el valor del ángulo  $\beta$ . Los resultados ASI de este par de perfiles muestran unos valores de ASI de 1,49 (perfil 44) y de 1,50 (perfil 75). La variación de aumentar en  $2,3^\circ$  el ángulo  $\beta$  sólo se ha traducido en el aumento de una centésima de ASI. Se esperaba que con el aumento de  $2,3^\circ$  tuviera un aumento más apreciable del ASI de como mínimo de algunas centésimas. De este modo, viendo estos resultados del modelo, la variación del ángulo  $\beta$  no tiene que influir demasiado en el valor ASI. Es de interés proponer valores mayores y menores de  $80^\circ$  y  $82,3^\circ$  para poder ver mejor la influencia de este ángulo con el índice ASI.

- Parámetro  $\delta$

El parámetro  $\delta$  pertenece al ángulo que se ha añadido en el último tramo hasta la coronación del perfil. Este tramo de barrera se supone que influye muy poco en el choque del vehículo contra la barrera. Por esta razón, como no influye en el índice de severidad se deberá imponer un valor  $\delta$  que disminuya lo máximo la anchura y sección del perfil. Para su ejecución en obra, el valor máximo de inclinación que se puede realizar es de  $87^\circ$ .

- Parámetros f, g, h, j, m

Estos parámetros ya están analizados de forma directa con el análisis del ángulo y lado contiguo de cada una de estas variables, por lo que ya quedan examinados. En algunas de estas variables se ha buscado alguna relación que aguarde con el índice ASI, pero hasta el momento no se ha creído conveniente exponer los resultados para no ser redundantes con las afirmaciones y conclusiones llegadas hasta este momento. Donde sí se ha extraído un análisis interesante es en la evolución del ASI de la suma de las variables  $f + g$  que analiza a continuación.

- Parámetros  $f + g$

Viendo la ineficacia de poder analizar y extraer conclusiones del parámetro  $c$ , se ha querido buscar algún conjunto de parámetros que muestren alguna tendencia del ASI sobre esta zona de influencia donde se produce el mayor impacto del coche contra la barrera. Estudiando diferentes conjuntos de variables, se ha encontrado la suma de  $f + g$  como una variable conjunta que describe la distancia horizontal existente después del plinto del perfil.

En la Figura 3.20 se muestran los resultados de esta evaluación; pudiéndose ver, claramente, la tendencia a la baja del índice ASI a medida que se aumenta la variable conjunta  $f + g$  hasta valores de ASI alrededor de 1,5. La disminución de ASI se estabiliza aproximadamente a partir de 240 mm, donde la reducción de ASI en proporción a  $f + g$  es poco apreciable. Se examina que para valores entre 244 y 255 mm se tienen ASIs entre 1,48 y 1,51, mientras que para un valor de 279 mm se tiene un ASI = 1,49. Por tanto, es posible que un valor óptimo de  $f + g$  se encuentre aproximadamente en 250 mm.

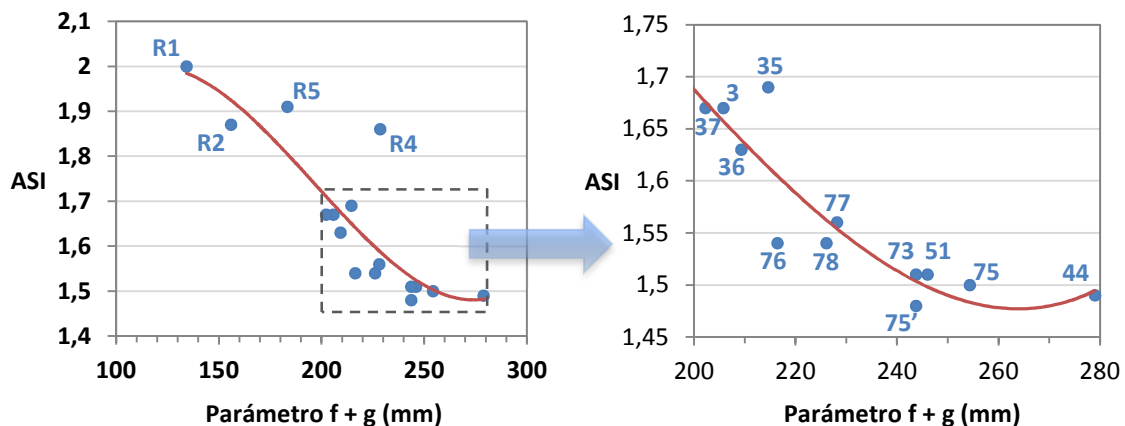


Figura 3.20. Influencia del parámetro  $f + g$  en el ASI.

### Conclusiones del análisis de los parámetros

Después del análisis de los resultados de los 14 perfiles simulados con el nuevo modelo, se han extraído las distintas conclusiones de cada parámetro como valores orientativos para posteriores propuestas en la Tabla 3.23. En principio, estos valores que se aconsejan para posteriores perfiles tienen por objetivo reducir el ASI, sin tener en cuenta el efecto de vuelco.

Parámetros	Comentarios
$a = 180 \text{ mm}$	Valor óptimo según la simulación
$b \geq 100 \text{ mm}$	Cuanto mayor sea $b$ , mejor para el ASI
$k \leq 200 \text{ mm}$	Mejor valores próximos de 100 a 150 mm
$150 \geq l \geq 100 \text{ mm}$	Es de interés valores cercanos a 150 mm para ver qué sucede con el ASI. Proponer valores por debajo de 100 mm se asegura el mejor ASI.
$\alpha \leq 80^\circ$	Proponer valores muy bajos incide a una elevación excesiva del vehículo
$\beta \leq 80^\circ$	Parece ser que el valor ASI es poco sensible a esta variable
$35^\circ \geq \gamma \geq 30^\circ$	Es de interés proponer valores por debajo de $30^\circ$
$\delta, \theta = 87^\circ$	Valor de ángulo máximo para disminuir anchura y sección
$f + g \approx 250 \text{ mm}$	Proponer $f + g$ mayores parece que no implique en un ASI más bajo

Tabla 3.23. Conclusiones de las 13 simulaciones con el nuevo modelo.

### 3.3.5- Desarrollo de las propuestas: perfiles 100 - 119

Una vez analizadas las simulaciones del modelo modificado, se plantea una nueva serie de propuestas de perfiles numerados entre el 100 y el 119. En esta fase se han simulado un total de 22 perfiles repartidos en 6 series. En la Tabla 3.24 se expone la distribución de las series y los objetivos que se persiguen en cada una. Posteriormente, se presenta el análisis de cada serie.

Serie	Número de propuestas	Numeración de los perfiles	Objetivo de la serie
14	7	75/2, 100 - 105	Valores óptimos de los ángulos $\alpha$ , $\gamma$ y $\beta$ del perfil 75'
15	8	106 - 112b	Optimización de los perfiles de la 13ª Serie para reducir ASI, anchura y sección
16	2	113 - 114	Tendencia del ASI respecto a los ángulos $\alpha$ y $\gamma$
17	2	115 - 116	Verificación de la tendencia de $\gamma$ y obtención de un ASI < 1,4 de acuerdo con la recomendación de $\beta$
18	2	117 - 118	Disminuir las anchuras y secciones de la 16ª Serie
19	1	119	Reducción del plinto en 3 cm del perfil 108

Tabla 3.24. Distribución de las series y de los objetivos de los perfiles del 110 al 119.

#### 14ª Serie: Valores óptimos de los ángulos $\alpha$ , $\gamma$ y $\beta$ del perfil 75'

En esta Serie de perfiles sugeridos, se ha fijado como patrón el perfil 75' ya que es la barrera que ha dado un mejor resultado ASI con un valor de 1,48 del nuevo modelo. Se ha creído conveniente hacer pequeñas variaciones de 2 grados en los ángulos  $\alpha$ ,  $\gamma$  y  $\beta$ , respecto a los

ángulos del perfil 75' para ver con estas leves modificaciones qué valores de ángulos dan mejor resultado ASI. En el caso del perfil 75/2 se ha propuesto una altura de plinto de 22 cm en vez de los 20 cm de los otros perfiles de esta tanda y de los 18 cm recomendados en los 13 primeros perfiles del nuevo modelo con el afán de presentar una mayor dificultad de remonte sobre la barrera. Además en este perfil no se ha incluido el plano perteneciente al parámetro k y se ha impuesto un espesor de coronación de 174,54 mm.

En la Tabla 3.25 se presentan las medidas geométricas y del ASI de los perfiles sugeridos. En ella se tienen que las anchuras de los perfiles planteados se encuentran entre los 70 y 76 cm, excepto el perfil 75/2 con una anchura de 65 cm. Respecto a las secciones, todas ellas los valores son cercanos a la área del perfil CSB entre los 0,302 y 0,330 m<sup>2</sup> incluido el perfil 75/2 con una sección de 0,322 debido al ancho espesor de coronación adoptado.

	Referencia	14ª Serie						
	75'	75/2	100	101	102	103	104	105
a (mm)	200	220	200	200	200	200	200	200
b (mm)	100	80	100	100	100	100	100	100
c (mm)	400	600	400	400	400	400	400	400
k (mm)	200	-	200	200	200	200	200	200
l (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-
d (mm)	900	900	900	900	900	900	900	900
e (mm)	150	174,54	150	150	150	150	150	150
f (mm)	70,5	73,7	70,5	70,5	56,2	85,0	70,5	70,5
g (mm)	173,2	133,1	173,2	173,2	173,2	173,2	188,1	160,0
h (mm)	35,3	30,9	28,1	42,5	35,3	35,3	35,3	35,3
i (mm)	<b>749,0</b>	<b>650,0</b>	<b>714,7</b>	<b>743,5</b>	<b>700,3</b>	<b>757,9</b>	<b>758,7</b>	<b>702,6</b>
j (mm)	10,5	-	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
m (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-
α (deg)	80	82	82	78	80	80	80	80
γ (deg)	30	31	30	30	30	30	28	32
β (deg)	80	83	80	80	82	78	80	80
δ (deg)	87	-	87	87	87	87	87	87
θ (deg)	-	-	-	-	-	-	-	-
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,334</b>	<b>0,322</b>	<b>0,315</b>	<b>0,317</b>	<b>0,302</b>	<b>0,330</b>	<b>0,323</b>	<b>0,309</b>
ASI	<b>1,48</b>	<b>1,54</b>	<b>1,48</b>	<b>1,42</b>	<b>1,54</b>	<b>1,43</b>	<b>1,4</b>	<b>1,52</b>

Tabla 3.25. Resultados de los perfiles 75/2 y 100 – 105.

Respecto a los valores ASI registrados, se encuentran entre 1,54 y 1,40. Entre estos resultados destacan los perfiles 104, 101 y 103 con valores ASI de 1,40, 1,42 y 1,43, respectivamente. Estos 3 perfiles cumplen con el marcado CE de clase B de barreras de seguridad redondeado el ASI a la décima tal y como estipula la norma con un ASI ≤ 1,4. La



característica que tienen en común estos 3 perfiles es la disminución de 2 grados en cada uno de ellos de un ángulo respecto al perfil de referencia de esta tanda.

El primer análisis que se realiza en esta Serie es la relación del índice ASI con la variación del ángulo  $\alpha$  manteniendo el parámetro  $a = 200$  mm. En este caso, los perfiles a evaluar son: el 75', el 100 y el 101. En la Figura 3.21 se muestra la tendencia del ASI según el valor  $\alpha$  adoptado. En la misma se observa una importante variación entre los 78° y 80°, con un aumento de 0,06 puntos ASI. En cambio, entre los 80° y 82° no hay variación alguna en el número ASI. A priori, es de esperar que cuanto más vertical sea este plano, mayor dificultad de subida del vehículo y mayor será el impacto del coche sobre la barrera. Este comportamiento se cumple entre los ángulos de 78° y 80° pero entre los 80° y 82° no hay ninguna variación en contra de lo esperado. Vistos los resultados es recomendable proponer para posteriores perfiles ángulos  $\alpha \leq 78^\circ$ .

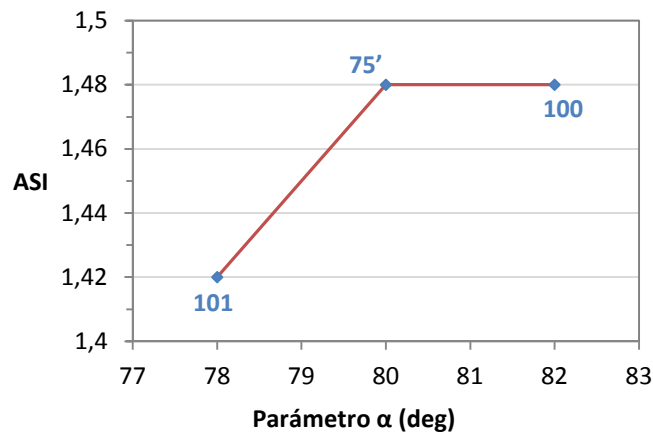
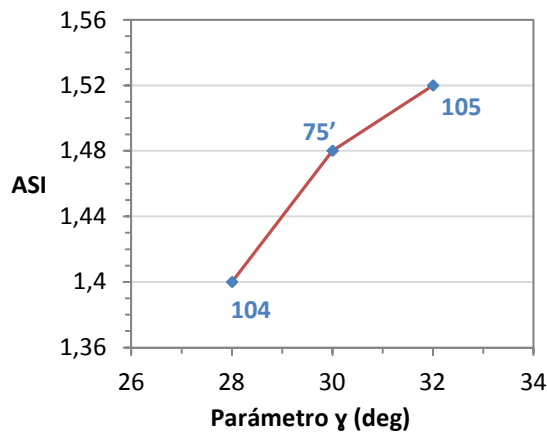
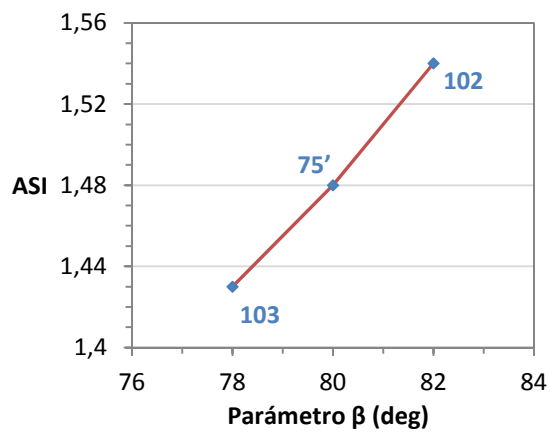


Figura 3.21. Influencia del ángulo  $\alpha$  en el ASI.

En este segundo análisis de esta Serie se han estudiado los perfiles 75', 104 y 105 donde la única diferencia entre ellos es el ángulo  $\gamma$  manteniendo el parámetro  $b = 100$  mm. En la Figura 3.22 se expone el desarrollo del ASI según el valor  $\gamma$  asignado; pudiéndose ver una importante variación entre los 28° y 30°, con un aumento de +0,08 puntos ASI. En cambio, entre los 30° y 32°, el aumento ASI experimentado es más moderado con la mitad del número anterior de +0,04 puntos. Este comportamiento se puede deber a un mejor acoplamiento del vehículo con la barrera durante el choque, adaptándose mejor la forma coche con el perfil con valores de  $\gamma$  más bajos. Con los resultados obtenidos, para posteriores tandas es recomendable proponer  $\gamma \leq 28^\circ$ .

En este tercer análisis de esta Serie de propuestas se han analizado los perfiles 75', 102 y 103 donde la única diferencia entre ellos es el ángulo  $\beta$  manteniendo el parámetro  $c = 400$  mm. En la Figura 3.23 se presenta la evolución del ASI según el valor  $\beta$  correspondiente. En la misma se observa el fuerte descenso del valor ASI a medida que se reduce el ángulo  $\beta$ . Entre los 82 y 80 grados se produce un descenso de 0,06 puntos y entre los 80 y 78 grados hay una bajada de 0,05 puntos. En este caso la variación del ángulo  $\beta$  se comporta de manera prácticamente lineal respecto a los valores ASI en esta franja de ángulos.

Figura 3.22. Influencia del ángulo  $\gamma$  en el ASI.Figura 3.23. Influencia del ángulo  $\beta$  en el ASI.

A diferencia de los resultados obtenidos con las 14 primeras simulaciones del nuevo modelo, en esta primera serie de propuestas del nuevo modelo, el parámetro  $\beta$  sí que tiene una influencia remarcable en el valor ASI. De este modo, visto los resultados se puede concluir que es recomendable proponer ángulos  $\beta$  iguales o inferiores a 78 grados, aunque con ello repercute un aumento de anchura y sección del perfil.

Como conclusión de esta 14ª Serie de propuestas se determina que el perfil tipo a definir deberá ser el determinado en las conclusiones recogidas en la Tabla 3.26.

Parámetros	Comentarios
$a = 180 \text{ mm}$	Se han obtenido valores satisfactorios con 200 mm
$b \geq 100 \text{ mm}$	Cuanto mayor sea b, mejor para el ASI
$k \leq 200 \text{ mm}$	Mejor valores próximos de 100 a 150 mm
$150 \geq l \geq 100 \text{ mm}$	Es de interés valores cercanos a 150 mm para ver qué sucede con el ASI. Proponer valores por debajo de 100 mm se asegura el mejor ASI.
$\alpha \leq 78^\circ$	Proponer valores muy bajos incide a una elevación excesiva del vehículo
$\beta \leq 78^\circ$	Tener cuidado en proponer anchuras y secciones excesivas
$\gamma \leq 28^\circ$	Esta condición viene condicionada por el parámetro b
$\delta, \theta = 87^\circ$	Valor de ángulo máximo para disminuir anchura y sección
$f + g \approx 250 \text{ mm}$	Proponer $f + g$ mayores parece que no implique en un ASI más bajo

Tabla 3.26. Conclusiones después de la 14ª Serie.

#### 15ª Serie: Optimización de los perfiles de la 14ª Serie para reducir ASI, anchura y sección

Con los resultados de la 14ª Serie, se ha procedido a proponer una nueva serie de 8 nuevos perfiles numerados de 106 a 112b (ver Tabla 3.27). De estas 8 sugerencias, en las barreras 106 a 109 se busca la combinación de los ángulos  $\alpha$ ,  $\gamma$  y  $\beta$  que mejor ASI se obtenga

partiendo como patrón los perfiles propuestos de la primera tanda. Del perfil 106 se han rebajado de 2º los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  respecto del perfil 104, del perfil 107 se ha disminuido de 2º el ángulo  $\alpha$  del perfil 101, del perfil 108 se ha reducido de 2º el ángulo  $\beta$  del perfil 103, y del perfil 109 se ha bajado de 2º el ángulo  $\gamma$  del perfil 104. Las barreras de 110 a 112b van encaminadas a la optimización de anchura y sección de los perfiles ya planteados pero con la posibilidad de obtener un valor ASI competitivo respecto al resto de propuestas. Las medidas geométricas introducidas en estos 4 perfiles planteados son básicamente 3 afectaciones.

	15ª Serie							
	106	107	108	109	110	111	112	112b
a (mm)	200	200	200	200	130	130	50	50
b (mm)	100	100	100	100	80	80	70	80
c (mm)	400	400	400	400	440	440	450	440
k (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200
l (mm)	-	-	-	-	50	50	130	130
d (mm)	900	900	900	900	900	900	900	900
e (mm)	150	150	150	150	150	150	150	150
f (mm)	85,0	70,5	99,7	70,5	93,5	93,5	79,3	77,6
g (mm)	188,1	173,2	173,2	205,0	138,6	114,3	121,2	138,6
h (mm)	42,5	49,9	35,3	35,3	27,6	27,6	8,8	8,8
i (mm)	<b>802,2</b>	<b>758,2</b>	<b>787,4</b>	<b>792,6</b>	<b>695,6</b>	<b>647,0</b>	<b>603,4</b>	<b>634,5</b>
j (mm)	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
m (mm)	-	-	-	-	2,6	2,6	6,8	6,8
$\alpha$ (deg)	78	76	80	80	78	78	80	80
$\gamma$ (deg)	28	30	30	26	30	35	30	30
$\beta$ (deg)	78	80	76	80	78	78	80	80
$\delta$ (deg)	87	87	87	87	87	87	87	87
$\theta$ (deg)	-	-	-	-	87	87	87	87
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,339</b>	<b>0,319</b>	<b>0,345</b>	<b>0,332</b>	<b>0,309</b>	<b>0,298</b>	<b>0,283</b>	<b>0,291</b>
ASI	<b>1,44</b>	<b>1,48</b>	<b>1,38</b>	<b>1,4</b>	<b>1,54</b>	<b>1,58</b>	<b>1,78</b>	<b>1,72</b>

Tabla 3.27. Resultados de los perfiles 106 – 112b.

La 1ª variable retocada es el parámetro b, donde en los perfiles 110, 111 y 112b se ha considerado un número igual a 80 mm, mientras que para el perfil 112 tiene un valor de 70 mm; valores todos ellos inferiores a los 100 mm recomendados.

La 2ª variable que varía es el valor de la suma de las variables f + g, donde en las 4 propuestas presentadas se llega a 232,1 mm del perfil 110, 207,8 mm del perfil 111, 200,5 mm del perfil 112 y 216,2 mm del perfil 112b. Se ha querido imponer estos 4 valores para ver si realmente sigue la tendencia expuesta en el análisis de los parámetros f + g. Además, esta disminución de longitud horizontal puede inducir a reducir la posibilidad de vuelco del vehículo.

La 3ª y última variable modificada son las medidas del plinto de la barrera con una altura igual a 180 mm, jugando con las variables de los parámetros  $a$  y  $l$ , donde en los casos de los perfiles 110 y 111, con  $l < 100$  mm, se quiere asegurar que la incidencia del plano de 87º sea nula frente al impacto. En cambio, en los perfiles 112 y 112b, con  $l > 100$  mm, se quiere provocar la rotura de la rueda, incidir un mayor rozamiento de la rueda sobre el plinto e impedir un mayor vuelo del vehículo que pueda repercutir en un vuelco.

Desde el punto de vista de las anchuras totales y secciones, los perfiles 106 a 109 son muy parecidos con anchuras de entre 76 y 80 cm, y con secciones entre 0,319 y 0,345 m<sup>2</sup>. Los valores de anchura se exceden demasiado del valor de 60 cm planteado de inicio en este proyecto, mientras que el de las secciones se acerca al perfil CSB de referencia. De los perfiles 110 a 112b, las medidas geométricas son muy competitivas, con valores de anchuras de 70 cm del perfil 110, de 65 cm en el caso del perfil 111, de 60 cm del perfil 112 y de 63,5 cm del perfil 112b. Mientras que en el caso de las secciones, la barrera 112 presenta la menor superficie de los perfiles simulados con 0,283 m<sup>2</sup> de sección, y le siguen el perfil 112 que tiene una superficie de 0,291 m<sup>2</sup>, el perfil 111 con una sección de 0,298 m<sup>2</sup> y el perfil 110 con una área de 0,309 m<sup>2</sup>; que representan una disminución entre el 11 % y el 3 % de superficie respecto al perfil CSB.

Después de simular los 8 perfiles propuestos, el mejor perfil ha sido el 108 con un ASI igual a 1,38, por debajo del 1,4 que indica barrera de clase B. De los perfiles de 106 a 109 los valores ASI se sitúan entre el 1,4 y el 1,48. Respecto a los perfiles de 110 a 112b se han obtenido valores por encima de los esperados con ASIs entre 1,54 y 1,78.

Del perfil 106, comparando con el 104, el ASI ha aumentado en 0,04. Era de prever que, al reducir los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  en 2º, el ASI se redujera pero ha sucedido lo contrario. Por tanto, los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  iguales o inferiores a 78º no son óptimos para reducir el ASI. Del perfil 107 comparando con el 101, se ha obtenido un ASI de 1,48 aumentando de 0,06 del ASI del 101. Este valor de severidad es el resultante de reducir el ángulo  $\alpha$  en 2º del 101. De este modo, no es recomendable proponer ángulos  $\alpha$  inferiores a 78º. Del perfil 108, reduciendo en 2º el parámetro  $\beta$  del perfil 103, se consigue un ASI igual a 1,38; reduciendo en 0,05 puntos ASI del 103. Así que, es óptimo reducir el parámetro  $\beta$  con valores iguales o inferiores a 76º.

Del perfil 109 respecto 104, cuya diferencia es la reducción del parámetro  $\gamma$  en 2º, no se aprecia en el modelo ninguna variación del índice de severidad. Entonces, reducir el parámetro  $\gamma$  con ángulos inferiores a 28º no tiene incidencia en el ASI. Los perfiles 110 y 111 se alcanzaron ASIs de 1,54 y 1,58 respectivamente, mientras que el perfil 112 se obtuvo un ASI igual a 1,78 y el 112b de 1,72; valores todos ellos muy lejanos al deseado. Por tanto, no se consiguió el objetivo de obtener un ASI competitivo de 1,4 con las mejoras geométricas introducidas.

Para poder analizar mejor los resultados obtenidos con las propuestas de 110 a 112b en comparación a los demás perfiles, en la Figura 3.24 se puede visualizar en la gráfica ASI – f + g la tendencia de todos los perfiles simulados. En ella se pueden ver que los perfiles propuestos en esta tanda siguen la misma tendencia presentada con los 13 primeros perfiles simulados con el

nuevo modelo. Por tanto, los cambios geométricos realizados en las barreras 110 a 112b, reduciendo de manera notable el valor  $f + g$  a valores inferiores de los 250 mm recomendados, los valores ASI de estas propuestas no mejoran la tendencia presentada. Entonces, es de especial importancia proponer valores  $f + g$  superiores a 250 mm para obtener un ASI inferior a 1,4, aunque incide negativamente mayores anchuras y secciones de perfil.

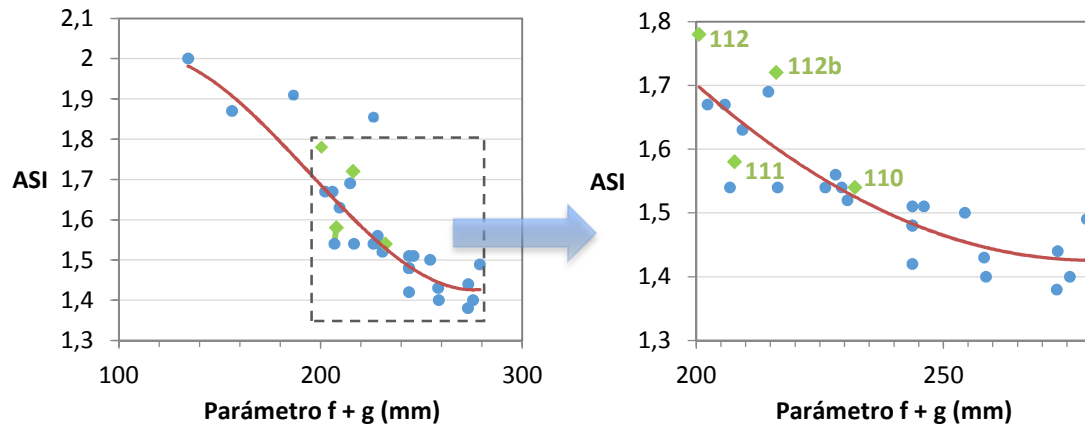


Figura 3.24. Influencia del parámetro  $f + g$  en el ASI.

Como conclusión de esta 15ª Serie de propuestas se determina que el perfil tipo a definir deberá ser el determinado en las conclusiones recogidas en la Tabla 3.28.

Parámetros	Comentarios
$a = 180 \text{ mm}$	Se han obtenido valores satisfactorios con 200 mm
$b \geq 100 \text{ mm}$	Cuanto mayor sea $b$ , mejor para el ASI
$k \leq 200 \text{ mm}$	Mejor valores próximos de 100 a 150 mm
$150 \geq l \geq 100 \text{ mm}$	Es de interés valores cercanos a 150 mm para ver qué sucede con el ASI Proponer valores por debajo de 100 mm se asegura el mejor ASI
$\alpha = 78^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$
$\beta \leq 76^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$
$\gamma = 28^\circ$	Esta condición viene condicionada por el parámetro $b$
$\delta, \theta = 87^\circ$	Valor de ángulo máximo para disminuir anchura y sección
$f + g > 250 \text{ mm}$	Proponer $f + g$ mayores implica mayor anchura y sección

Tabla 3.28. Conclusiones después de la 15ª Serie.

#### 16ª Serie: Comprobación de las tendencias de los ángulos $\beta$ y $\gamma$

La 16ª Serie de propuestas corresponde a dos perfiles nuevos que pretenden ver la influencia de reducir, por una parte, el ángulo  $\beta$  por debajo de los  $76^\circ$  comparando con el perfil 108 y, por otra parte, reducir el ángulo  $\gamma$  por debajo de los  $26^\circ$  equiparándolo con el perfil 109.

En la Tabla 3.29 se presentan los perfiles 113 y 114 que poseen dichos cambios. En ella, se aprecia unas anchuras muy grandes de 82 y 83 cm en vez de los 60 cm deseados. Las secciones expuestas también presentan áreas elevadas de 0,360 m<sup>2</sup> del perfil 113 y de 0,342 m<sup>2</sup> del perfil 114; que representan un 14 % y un 8 % superiores al perfil CSB.

16º Serie	113	114
a (mm)	200	200
b (mm)	100	100
c (mm)	400	400
k (mm)	200	200
l (mm)	-	-
d (mm)	900	900
e (mm)	150	150
f (mm)	114,7	70,5
g (mm)	173,2	224,6
h (mm)	35,3	35,3

16º Serie	113	114
i (mm)	817,3	831,8
j (mm)	10,5	10,5
m (mm)	-	-
$\alpha$ (deg)	80	80
$\gamma$ (deg)	30	24
$\beta$ (deg)	74	80
$\delta$ (deg)	87	87
$\theta$ (deg)	-	-
Área (m <sup>2</sup> )	0,360	0,342
ASI	1,42	1,39

Tabla 3.29. Resultados de las simulaciones de las propuestas 113 y 114.

De los resultados ASI obtenidos de la simulación, se tiene para el perfil 113 un ASI = 1,42 y para el perfil 114 un ASI = 1,39. Del perfil 113, la reducción a 74º del ángulo  $\beta$  ha correspondido en un aumento del ASI de 0,04 en relación al perfil 108. Así que, que para  $\beta = 76^\circ$  es el valor óptimo para conseguir el menor ASI. Para ver mejor este comportamiento, en la Figura 3.25 se enseña la influencia del ángulo  $\beta$  con los perfiles 75', 102, 103, 108; pudiéndose ver el valor mínimo comentado. Respecto con el ASI del perfil 114, se obtiene un descenso muy pequeño de 0,01 respecto al perfil 109. Por tanto, la disminución del ángulo  $\gamma$  de 2º en base al perfil 109 afecta muy poco al índice de severidad de impacto. Anteriormente, en la 14ª Serie, ya se había detectado que la reducción del parámetro  $\gamma$  a valores inferiores a 28º no afectan al valor ASI.

En la Figura 3.26 se muestra la evolución del ángulo  $\gamma$  en el ASI con los perfiles 75', 104, 105, 109 y 114, cuya única diferencia entre ellos es la variación del ángulo  $\gamma$ .

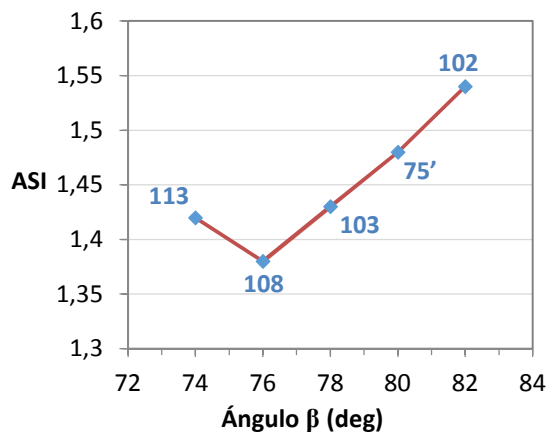


Figura 3.25. Influencia del ángulo  $\beta$  en el ASI.

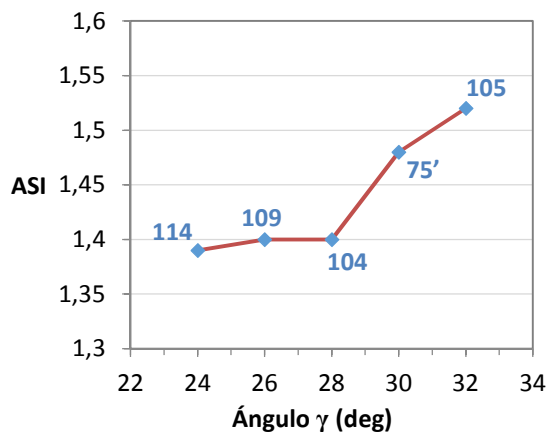


Figura 3.26. Influencia del ángulo  $\gamma$  en el ASI.

Como conclusión de esta 16ª Serie de propuestas se determina que el perfil tipo a definir deberá ser el determinado en las conclusiones recogidas en la Tabla 3.30.

Parámetros	Comentarios
$a = 180 \text{ mm}$	Se han obtenido valores satisfactorios con 200 mm
$b \geq 100 \text{ mm}$	Cuanto mayor sea b, mejor para el ASI
$k \leq 200 \text{ mm}$	Mejor valores próximos de 100 a 150 mm
$150 \geq l \geq 100 \text{ mm}$	Es de interés valores cercanos a 150 mm para ver qué sucede con el ASI Proponer valores por debajo de 100 mm se asegura el mejor ASI
$\alpha = 78^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$
$\beta = 76^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$
$\gamma = 28^\circ$	Esta condición viene condicionada por el parámetro b
$\delta, \theta = 87^\circ$	Valor de ángulo máximo para disminuir anchura y sección
$f + g > 250 \text{ mm}$	Proponer f + g mayores implica mayor anchura y sección

Tabla 3.30. Conclusiones después de la 16ª Serie.

**17ª Serie: Verificación de la tendencia de  $\gamma$  y obtención de un ASI < 1,4 de acuerdo con  $\beta$**

Con los resultados de la 16ª Serie, en la 17ª Serie se proponen dos nuevos perfiles con dos objetivos distintos. El primer objetivo reside en el perfil 115 que es una modificación del perfil 114, con la única modificación del parámetro  $\beta$  disminuyéndolo de  $80^\circ$  a  $76^\circ$ , por lo que se espera que se baje del ASI = 1,39. El segundo objetivo, con el perfil 116 comparándolo con el perfil 114, es verificar si disminuyendo el ángulo  $\gamma$  por debajo de los  $24^\circ$  el ASI no varía tal y como se ha observado en los resultados de la tercera tanda.

En la Tabla 3.31 se muestran los datos geométricos de las propuestas y los índices de severidad de impacto de la simulación. Referente a los datos geométricos de los perfiles 115 y 116, las anchuras de los dos perfiles son muy amplios de casi 90 cm. Las secciones también son cuantiosas de  $0,371 \text{ m}^2$  del perfil 115 y de  $0,353 \text{ m}^2$  del perfil 116, que representan una área superior en un 17 % del perfil 115 y un 11 % del perfil 116 acerca del perfil CSB.

De los resultados del índice ASI, el perfil 115 ha conseguido un ASI = 1,38. A priori, este valor es un buen resultado ya que se encuentra por debajo del 1,4 pero comparándolo con el ASI del perfil 114, sólo se ha registrado un descenso 0,01. En este caso, era de suponer un mayor descenso al reducir el ángulo  $\beta$  en 4 grados pero en la simulación no ha sido así. Aunque, este perfil ha conseguido un buen índice de severidad de impacto tiene unos valores de anchura y sección demasiado grandes. Del perfil 116 propuesto, se ha obtenido un ASI igual 1,44. Este valor ha roto la tendencia de obtener un ASI igual o menor al reducir el ángulo  $\gamma$  hasta los  $22^\circ$ .

17ª Serie	115	116	17ª Serie	115	116
a (mm)	200	200	i (mm)	890,2	877,6
b (mm)	100	100	j (mm)	10,5	10,5
c (mm)	400	400	m (mm)	-	-
k (mm)	200	200	$\alpha$ (deg)	80	80
l (mm)	-	-	$\gamma$ (deg)	24	22
d (mm)	900	900	$\beta$ (deg)	76	80
e (mm)	150	150	$\delta$ (deg)	87	87
f (mm)	99,7	70,5	$\theta$ (deg)	-	-
g (mm)	224,6	247,5	Área (m <sup>2</sup> )	0,371	0,353
h (mm)	35,3	35,3	ASI	1,38	1,44

Tabla 3.31. Resultados de las simulaciones de las propuestas 115 y 116.

En la Figura 3.27 se expone la evolución del ASI respecto al ángulo  $\gamma$ , cuyos perfiles mostrados tienen las mismas características geométricas con la única variación de este parámetro. En esta gráfica se observa que los valores óptimos de ASI se encuentran entre los 24º y los 28º.

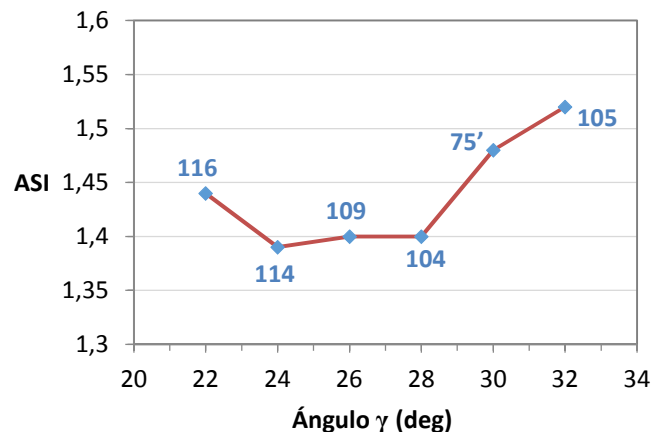


Figura 3.27. Influencia del ángulo  $\gamma$  en el ASI.

Como conclusión de esta 17ª Serie de propuestas se determina que el perfil tipo a definir deberá ser el determinado en las conclusiones recogidas en la Tabla 3.32.

#### 18ª Serie: Disminuir las anchuras y secciones de la 17ª Serie

La 18ª Serie tiene por objetivo disminuir los valores de anchura y sección de la 17ª Serie e intentar reducir el índice ASI obtenido del perfil 115. Con esta premisa se plantean dos perfiles cuya característica es la variación de los parámetros b, c y k (ver Tabla 3.33). En los dos perfiles se ha reducido el valor de b por debajo de los 100 mm y se aumentado el valor k por encima de los 200 mm, cuyas acciones afectan negativamente el valor de ASI.



Parámetros	Comentarios
$a = 180 \text{ mm}$	Se han obtenido valores satisfactorios con 200 mm
$b \geq 100 \text{ mm}$	Cuanto mayor sea b, mejor para el ASI
$k \leq 200 \text{ mm}$	Mejor valores próximos de 100 a 150 mm
$150 \geq l \geq 100 \text{ mm}$	Es de interés valores cercanos a 150 mm para ver qué sucede con el ASI Proponer valores por debajo de 100 mm se asegura el mejor ASI
$\alpha = 78^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$
$\beta = 76^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$
$24^\circ \leq \gamma \leq 28^\circ$	Esta condición viene condicionada por el parámetro b
$\delta, \theta = 87^\circ$	Valor de ángulo máximo para disminuir anchura y sección
$f + g > 250 \text{ mm}$	Proponer f + g mayores implica mayor anchura y sección

Tabla 3.32. Conclusiones después de la 17ª Serie.

18ª Serie	117	118	18ª Serie	117	118
a (mm)	200	200	i (mm)	783,9	725,7
b (mm)	78	67	j (mm)	12,9	14,8
c (mm)	375	350	m (mm)	-	-
k (mm)	247	283	$\alpha$ (deg)	80	80
l (mm)	-	-	$\gamma$ (deg)	24	24
d (mm)	900	900	$\beta$ (deg)	76	76
e (mm)	150	150	$\delta$ (deg)	87	87
f (mm)	93,5	87,3	$\theta$ (deg)	-	-
g (mm)	175,2	150,5	Área (m <sup>2</sup> )	0,333	0,312
h (mm)	35,3	35,3	ASI	1,4	1,48

Tabla 3.33. Resultados de las simulaciones de las propuestas 117 y 118.

Las anchuras de las barreras propuestas son de 78 cm del perfil 117 y de 73 cm del perfil 118; estas anchuras se han reducido de forma apreciable respecto del perfil 115 de 89 cm. De los valores de sección también se han visto claramente rebajadas con áreas de 0,333 m<sup>2</sup> del perfil 117 y 0,312 m<sup>2</sup> del perfil 118, en vez de los 0,371 m<sup>2</sup> del perfil 115.

En cuanto a los resultados del ASI, los dos perfiles no han conseguido bajar el valor de 1,38 del perfil 115. En el caso del perfil 117 se produce un leve aumento de 0,02 mientras que para el perfil 118 hay un aumento de 0,1. Por tanto, disminuir el parámetro b por debajo de 100 mm implica un aumento del ASI. Esta afirmación se apoya con la Figura 3.28 donde se muestra el desarrollo del ASI acerca del parámetro b con los perfiles 115, 117 y 118.

La otra variable que se ha modificado es el parámetro k donde se han propuesto valores de k iguales a 247 mm (perfil 117) y 283 mm (perfil 118). En la Figura 3.29 se ve que cuanto

menor sea el parámetro  $k$ , menor ASI le corresponde. Además se observa que a partir de valores inferiores a 250 mm, el ASI disminuye con una menor pendiente. Por tanto, para posteriores perfiles se sugiere valores de  $k \leq 200$  mm.

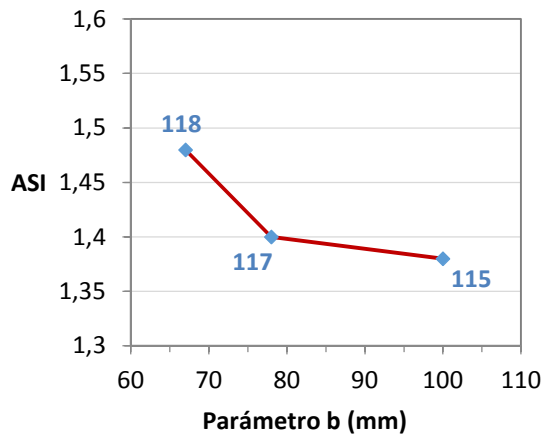


Figura 3.28. Influencia del parámetro  $b$  en el ASI.

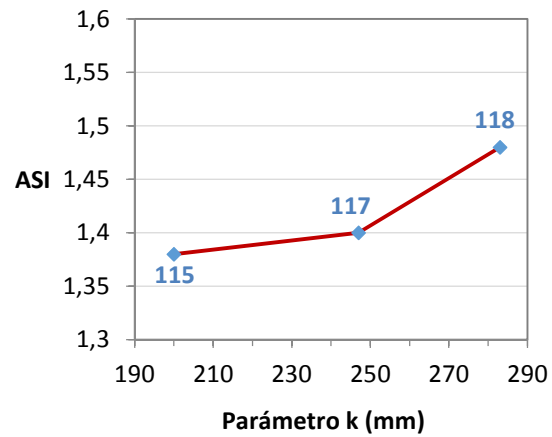


Figura 3.29. Influencia del parámetro  $k$  en el ASI.

Como conclusión de esta 18ª Serie de propuestas se determina que el perfil tipo a definir deberá ser el determinado en las conclusiones recogidas en la Tabla 3.34.

Parámetros	Comentarios
$a = 180$ mm	Se han obtenido valores satisfactorios con 200 mm
$b \geq 100$ mm	Cuanto mayor sea $b$ , mejor para el ASI
$k \leq 200$ mm	Mejor valores próximos de 100 a 150 mm
$150 \geq l \geq 100$ mm	Es de interés valores cercanos a 150 mm para ver qué sucede con el ASI Proponer valores por debajo de 100 mm se asegura el mejor ASI
$\alpha = 78^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$
$\beta = 76^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$
$24^\circ \leq \gamma \leq 28^\circ$	Esta condición viene condicionada por el parámetro $b$
$\delta, \theta = 87^\circ$	Valor de ángulo máximo para disminuir anchura y sección
$f + g > 250$ mm	Proponer $f + g$ mayores implica mayor anchura y sección

Tabla 3.34. Conclusiones después de la 18ª Serie.

#### 19ª Serie: Reducción del plinto en 3 cm del mejor perfil de todos, el perfil 108

La 19ª Serie de propuestas corresponde a una sola propuesta con el fin de buscar qué efecto puede repercutir, disminuir en 3 cm del parámetro  $a$  en el valor ASI del mejor perfil obtenido hasta ahora (perfil 108 con un ASI = 1,38). Esta reducción de 3 cm se impone en el plinto como consecuencia para ver cómo se produce el impacto y también el hecho de ver las

consecuencias que comportan el reparo de la carretera con recrecidos del pavimento si no se fresa previamente. En base al perfil 108, se basa el perfil propuesto 119, con una  $a = 170$  mm y una altura total de la barrera de 870 mm.

Acto seguido, en la Tabla 3.35 se muestran los datos geométricos y el índice de severidad de impacto de esta propuesta y también del perfil 108 de referencia. Los datos geométricos de esta nueva propuesta consiguen reducciones leves de la anchura y sección de la barrera 108. La anchura total es de 78 cm en vez de los 79 cm, y la sección es de  $0,322$  m<sup>2</sup> frente a los  $0,345$  m<sup>2</sup>. El área registrada en esta nuevo perfil se acerca mucho al perfil de referencia CSB de sección  $0,317$  m<sup>2</sup>.

19ª Serie	108	119	19ª Serie	108	119
a (mm)	200	170	i (mm)	787,4	776,8
b (mm)	100	100	j (mm)	10,5	10,5
c (mm)	400	400	m (mm)	-	-
k (mm)	200	200	$\alpha$ (deg)	80	80
l (mm)	-	-	$\gamma$ (deg)	30	30
d (mm)	900	870	$\beta$ (deg)	76	76
e (mm)	150	150	$\delta$ (deg)	87	87
f (mm)	99,7	99,7	$\theta$ (deg)	-	-
g (mm)	173,2	173,2	Área (m <sup>2</sup> )	0,345	0,322
h (mm)	35,3	30	ASI	1,38	0,96

Tabla 3.35. Resultados de la simulación propuesta 119.

Referente al valor ASI del modelo se ha conseguido un sorprendente 0,96. En principio, con la reducción del parámetro  $a$  hasta los 17 cm se esperaba un aumento del ASI respecto al perfil 108 con la experiencia de los resultados obtenidos, ya que en ningún caso se había bajado de un ASI = 1. Este valor menor de 1, se le asigna una barrera de clase A.

Las causas de este bajo valor ASI del perfil 119 no son claras, quizás las modificaciones que se han ido haciendo el modelo de simulación, donde el coche puede tener un comportamiento totalmente diferente durante el choque respecto a los modelos primerizos de este proyecto. El hecho que la altura del plinto sea 3 cm inferior a la recomendada según los resultados anteriores, en realidad puede inducir una ayuda para que la rueda se deforme mejor y ayude al vehículo a desplazarse sobre la barrera permitiendo al coche un mejor deslizamiento sobre la barrera.

Como conclusión de esta 19ª Serie de propuestas se determina que el perfil tipo a definir deberá ser el determinado en las conclusiones recogidas en la Tabla 3.36.

Finalmente, después de los resultados obtenidos hasta este momento, el **perfil 119** con un ASI =  $0,96 < 1$ , con una sección de  $0,322$  m<sup>2</sup> y una anchura total de 776,8 mm; es el escogido para realizar un ensayo real para poder corroborar el resultado de la simulación numérica.

Posteriormente al ensayo de impacto, se detectó una mala implementación de los datos en el programa, dando como resultado un ASI de la simulación de 1,71. Por tanto, la propuesta 119 de rebajar 3 cm el plinto hasta una cota de 170 mm induce a un mayor índice de severidad de impacto. Por tanto, se recomienda una altura de plinto de 200 mm.

Parámetros	Comentarios
$a = 170 \text{ mm}$	Se han obtenido valores satisfactorios con 180 y 200 mm
$b \geq 100 \text{ mm}$	Cuanto mayor sea b, mejor para el ASI
$k \leq 200 \text{ mm}$	Mejor valores próximos de 100 a 150 mm
$150 \geq l \geq 100 \text{ mm}$	Es de interés valores cercanos a 150 mm para ver qué sucede con el ASI Proponer valores por debajo de 100 mm se asegura el mejor ASI
$\alpha = 78^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$
$\beta = 76^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$
$24^\circ \leq \gamma \leq 28^\circ$	Esta condición viene condicionada por el parámetro b
$\delta, \theta = 87^\circ$	Valor de ángulo máximo para disminuir anchura y sección
$f + g > 250 \text{ mm}$	Proponer f + g mayores implica mayor anchura y sección

Tabla 3.36. Conclusiones después de la 19ª Serie.

### 3.3.6- Resumen de resultados de la simulación numérica

En total se han analizado 90 propuestas de perfiles simulados, además de la repetición de 12 perfiles con el modelo modificado. Iniciando desde los perfiles de referencia, como modelos de punto de partida para el desarrollo de las simulaciones hasta llegar al perfil 119.

En la Figura 3.30 se muestra de forma cronológica la evolución del índice ASI con las simulaciones del modelo inicial 1 - 74, la repetición de los 12 perfiles ya simulados (añadiendo perfil 43) pero con el modelo modificado y, posteriormente, los perfiles desde el 74 hasta al 119.

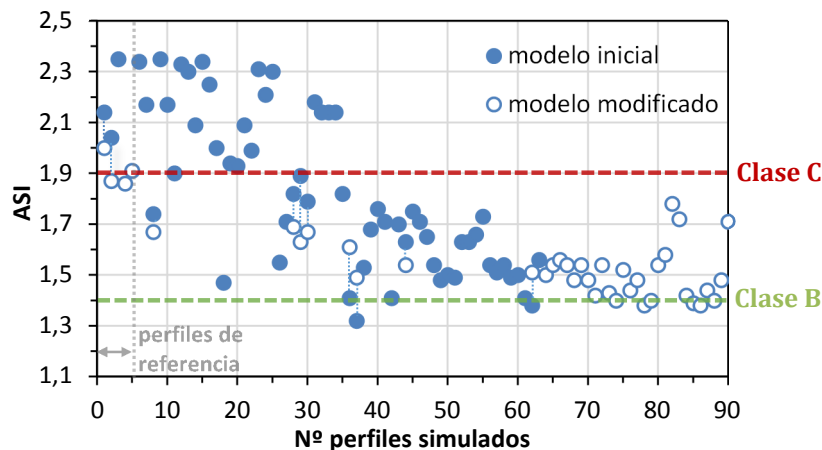


Figura 3.30. Evolución cronológica del ASI de los perfiles propuestos simulados.

En ella, se aprecia una tendencia a la baja del índice ASI a medida que se ha ido avanzando el estudio de nuevas propuestas de perfiles. Se nota una clara mejora de los resultados desde los valores iniciales por encima de un ASI de 2 hasta estabilizarse con ASIs entorno entre el 1,4 y el 1,5. Por tanto, se observa claramente que existe un límite inferior de ASI jugando con la forma del perfil de la barrera. Es curioso ver que este límite de ASI = 1,4 sea el valor frontera para clasificar una barrera de clase C a B.

Gracias a este extenso análisis de todas las propuestas de simulación realizadas, en la Tabla 3.37 se muestra el intervalo de valores más favorables para su diseño para obtener el valor ASI más bajo posible.

Parámetros	Comentarios
a = 200 mm a ≥ 100 mm	Es posible que el mínimo se encuentre entre 180 y 200 mm Cuando se incluye el parámetro l en el diseño del perfil
b ≥ 100 mm	Es aconsejable valores por encima de 120 mm
c	Parámetro que depende: $c = d - (a + b + k)$
d = 900 mm	Parámetro fijado
e = 150 mm	Proponer valores inferiores implica peligro de rotura
f	Parámetro que depende de c y $\beta$
g	Parámetro que depende de b y $\gamma$
f + g > 250mm	Proponer valores muy superiores tampoco no se reduce tanto el valor de ASI
h	Parámetro que depende de c y $\alpha$
i	Parámetro que depende de e, f, g, h, j y m. Se recomienda obtener el menor ancho posible, a poder ser de 600 mm
j	Parámetro que depende de k y $\delta$
k ≤ 200 mm	Valores por debajo de 150 mm se asegura su nula incidencia en el ASI
l ≤ 100mm	Valores por debajo de 50 mm se asegura su nula incidencia en el choque
m	Parámetro que depende de l y $\theta$
$\alpha = 78^\circ$	Este parámetro tiene poca incidencia. Se puede aumentarlo si se cree conveniente
$24^\circ \leq \gamma \leq 28^\circ$	Parece ser que el valor óptimo es $30^\circ$ o superior de acuerdo con la condición del parámetro b
$\beta = 76^\circ$	Se han obtenido valores satisfactorios con $80^\circ$ . Sección excesiva con valores inferiores a $78^\circ$
$\delta = 87^\circ$	Valor máximo para que sea construible
$\theta = 87^\circ$	Valor máximo para que sea construible

Tabla 3.37. Valores de los parámetros a aconsejar fruto de la simulación numérica.

Siguiendo estrictamente el diseño de un perfil con estos rangos de valores muy posiblemente se tenderá a formas de perfil bastante anchos. Este hecho conlleva a una mayor facilidad en el remonte del vehículo sobre la barrera, pudiéndose elevar demasiado y suceder

dos comportamientos anómalos: la elevación del coche sobre la cota de coronación de la barrera o el vuelco. Las dos posibilidades no son aceptables tal y como exige la norma EN 1317.

### 3.4.- CONCLUSIONES

Para finalizar, se pretende hacer una recopilación de las ideas y resultados más importantes que se han sacado a medida que se ha ido avanzando en el desarrollo en la forma del perfil a través del modelo de simulación. Como se podrá ver, parte de las conclusiones responden a los objetivos planteados en el inicio de este capítulo. A continuación se presentan por puntos las conclusiones a las que se han llegado.

- Se ha conseguido determinar una forma de perfil tipo que genera las mejores prestaciones de seguridad con los valores ASI más bajos, acotando un rango de valores para cada variable geométrica.
- Entre todas las variables geométricas consideradas, las más importantes respecto al índice ASI son la altura de plinto ( $a$ ) y la zona de transición entre el plinto y la parte superior de la barrera ( $b$ ,  $g$  y  $\gamma$ ). En menor medida, también el ángulo de inclinación de la parte superior de la barrera ( $\beta$ ).
- Se ha apreciado que existe un límite inferior de ASI entre 1,4 y 1,5, después de analizar más de 100 simulaciones.
- Con sólo la modificación geométrica del perfil es realmente difícil obtener una barrera de clase B.
- El desarrollo del modelo de simulación ha sido de manera evolutiva, contrastando los resultados obtenidos con los ensayos de impacto real y modificándolo para adecuarlo a la realidad.



## CAPÍTULO 4

# Contrastación experimental

### 4.1.- INTRODUCCIÓN

En el capítulo 3 se ha presentado el estudio llevado a cabo para el diseño geométrico de la barrera. A través de la modelización numérica se ha ido desarrollando la forma del perfil óptima (asociada al valor del ASI más bajo posible). Para ello, se han modelado un gran número de perfiles con diferentes geometrías para su simulación para poder determinar el perfil idóneo. Además, el modelo numérico utilizado se ha ido modificando para asimilarlo más a la realidad.

Durante esta evolución se han ido proponiendo perfiles para su contrastación en el ensayo real. Para cada perfil ensayado se han registrado los resultados obtenidos de cada parámetro considerado (ASI, THIV, giros de rotación, marcas de rozamiento entre otras). En base a estos resultados es posible ver la evolución que ha seguido cada parámetro a medida que se ha ido proponiendo nuevas formas de perfil para el ensayo de impacto.

El **objetivo principal** del presente capítulo es la contrastación experimental de los ensayos de- impacto realizados. Para conseguir este hito se plantean otros objetivos específicos:

- Contrastar los resultados ASI obtenidos en el modelo de simulación con los ensayos de impacto real.
- Identificar y analizar los parámetros considerados de impacto y post-impacto de todos los ensayos.



- Evaluar la sensibilidad del modo de impacto y respuesta vehículo – barrera frente a las tolerancias que permite la normativa vigente (EN 1317 (2010)) para realizar el ensayo de impacto.

Para alcanzar los objetivos planteados se ha seguido la siguiente **metodología** de trabajo:

- 1º. Presentación de los ensayos realizados y la evolución de la forma geométrica del perfil.
- 2º. Mostrar la metodología común seguida para cada ensayo de impacto real.
- 3º. Identificar los parámetros a analizar de cada ensayo de impacto.
- 4º. Análisis de cada variable de todo el conjunto de ensayos realizados.

## 4.2.- ENSAYOS REALIZADOS

En la Tabla 4.1 se muestran los 8 ensayos de impacto que se han realizado del perfil continuo (asociado a los perfiles del capítulo 3) ordenados por orden cronológico; mientras que en el capítulo 5 se presentan los resultados del perfil con juntas. El ensayo 51 nulo de la Tabla 4.1 corresponde a la falta de medidas debido a un fallo del acelerómetro. El número total de perfiles ensayados es de cinco (5) y son: los perfiles de referencia R1 (CSB) y R2 (Inicial), y los perfiles 51, 73 y 119. En el caso del perfil 51 se han ensayado un total de 4 ensayos: 2 ensayos idénticos, 1 ensayo nulo y 1 ensayo modificando las condiciones de ensayo.

Perfil	Fecha	Objetivo
R2	24/02/2014	Resultado ASI de referencia para el inicio de propuestas de forma de perfil
51 1 <sup>er</sup>	06/09/2012	Conseguir un ASI < 1,6
51 nulo	25/09/2012	Repetividad del ASI de ensayo
51 2º	27/09/2012	Repetividad del ASI de ensayo
73	14/03/2013	Conseguir un ASI ≤ 1,4
119	06/09/2013	Conseguir un ASI ≤ 1,4
R1	11/03/2014	Comprobar si es una barrera de clase B (ASI ≤ 1,4)
51 3 <sup>er</sup>	26/07/2014	Incidencia en el ASI sobre el margen de tolerancias del ensayo

*Tabla 4.1. Objetivos específicos de los ensayos de impacto.*

Aparte del objetivo principal común de contrastar los resultados del ensayo de impacto, para cada ensayo hay un objetivo específico en referencia al índice ASI. Para el perfil R2, se ha querido obtener un valor de ASI de referencia para empezar el estudio de las propuestas de perfiles. El 1<sup>er</sup> ensayo del perfil 51 tiene como objetivo obtener un ASI inferior a 1,6, mientras

que el 2º ensayo del mismo perfil se ha querido ver la repetitividad del ASI de ensayo. Los perfiles 73 y 119 tienen el objetivo común de obtener, si es posible, un ASI igual o inferior a 1,4. En cambio para el perfil R1, se ha querido comprobar si realmente se trata de una barrera de clase B; y, por finalizar el 3º ensayo del perfil 51 tiene por objetivo la variación del valor de ASI a partir de las modificaciones de las condiciones de ensayo en base a las tolerancias que permite la normativa EN 1317 (2010).

En la Figura 4.1 se exponen por orden cronológico, los 5 perfiles ensayados. Desde los perfiles de referencia R1 y R2, pasando por los perfiles 51 y 73, y finalizando con el perfil 119. La evolución que ha seguido el diseño del perfil se traduce en un aumento gradual de la anchura de la barrera junto con unos ángulos de inclinación menores. Estas medidas responden a la necesidad de adaptar la forma de la parte frontal del vehículo con el perfil y facilitar el deslizamiento del coche sobre la barrera.

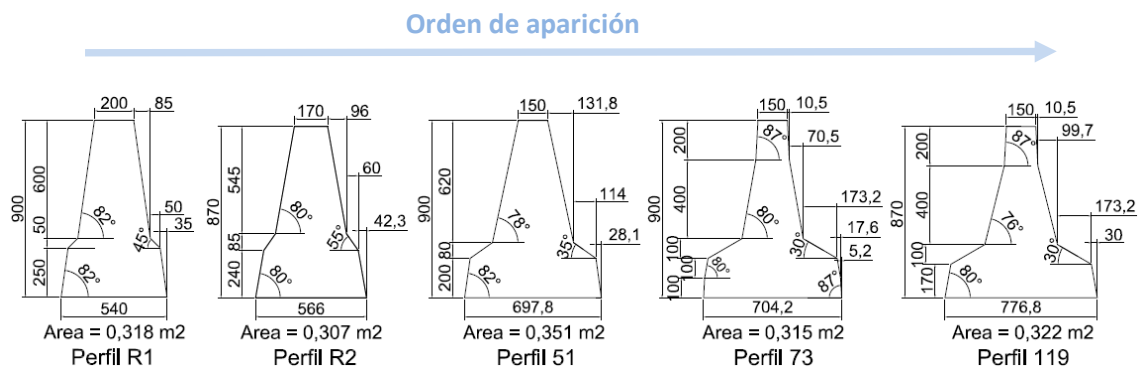


Figura 4.1. Perfiles de barrera propuestos para el ensayo de impacto. Cotas en mm.

### 4.3.- CONFIGURACIÓN BÁSICA DE ENSAYO

Cada uno de los ensayos de impacto ha seguido una metodología común. Tanto desde el punto de vista de las instalaciones, del modo constructivo y de las dosificaciones empleadas, así como de las condiciones del ensayo de impacto y de la secuencia de análisis previo y posterior del choque. De este modo, acto seguido se describen las características comunes de los ensayos.

#### 4.3.1- Instalaciones

Cada uno de los ensayos de impacto se ha realizado en la pista de las instalaciones de Applus+ IDIADA en l'Albornar, municipio de Santa Oliva (Tarragona). En la Figura 4.2 se muestra la pista de ensayo, donde se aprecian 3 zonas principales: la zona de aceleración y lanzamiento donde el vehículo se acelera hasta alcanzar la velocidad de ensayo mediante un rail equipado con un sistema de propulsión; la zona en que se encuentra instalada la barrera de seguridad donde se impacta el coche; y finalmente la zona de frenado en el cual se detiene el automóvil sobre un lecho de grava y protegido en el final de la pista por elementos de atenuación (neumáticos).



Figura 4.2. Pista de ensayo. (Fuente: IDIADA)

### 4.3.2- Construcción y dosificaciones empleadas

Acorde con el tipo de hormigón deslizado empleado en la construcción de las barreras, en la Tabla 4.2 se exponen las 2 dosificaciones que se han utilizado. La dosificación D1 se ha usado en las 4 primeras barreras construidas con los perfiles R2, 51, 73 y 119. La dosificación D2 es la utilizada para las 2 últimas barreras con los perfiles R1 y 51.

Material	D1	D2
Arena	900	950
Gravilla 5/12	800	150
Grava 12/20	200	800
Cemento CEM II A-V 42,5 R	350	350
Plastificante	1 L/m <sup>3</sup>	1 L/m <sup>3</sup>
Aireante	1 L/m <sup>3</sup>	1 L/m <sup>3</sup>
Agua	≈175	≈175

Tabla 4.2. Dosificaciones utilizadas (en Kg/m<sup>3</sup>).

Observando las proporciones de las dos dosificaciones, se aprecia que las cantidades de cemento, plastificante, aireante y agua son las mismas. En cambio, las cantidades de gravilla 5/12 y grava 10/20 varían de manera substancial (en una disminución del 81 % de la gravilla y en un aumento del 200 % de la grava) y en menor medida las de arena. Estas modificaciones tienen un doble objetivo.

El primer objetivo van encaminado a reducir las coqueras y los huecos que aparecieron sobretodo en la zona superior de las barreras con la dosificación D1 con el fin de dar un mejor acabado del perfil con un aspecto más liso.

El segundo objetivo es mejorar la trabajabilidad del hormigón, donde se visualiza que la dosificación D1 tiene unas proporciones de granulometría en forma de cono (proporciones: Arena > Gravilla > Grava) y en cambio la dosificación D2 tiene unas proporciones de

granulometría en forma de diábolo (proporciones: Arena > Gravilla, Gravilla < Grava) (Parapinski, 2010). Las proporciones de la D1 son más propias de una mezcla para descarga en tolva, mientras que las proporciones de la D2 son más aptas para el bombeo. Por tanto, la D2 es más apta para la extrusión del hormigón por el molde.

Analizando las proporciones empleadas se aprecia que la cantidad de arena fina con una proporción de 900 (D1) o 950 (D2) Kg, se acerca al valor recomendado de unos 1000 Kg/m<sup>3</sup> en base a la experiencia desarrollada por la empresa PROMSA junto con la Universidad Politécnica de Cataluña (García, 2004). Como todo hormigón deslizado es necesario una proporción de aireante que en este caso es de 1 L/m<sup>3</sup>; y también se añade 1 L/m<sup>3</sup> de plastificante para mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

La proporción de cemento de 350 Kg/m<sup>3</sup> se asemeja al valor recomendado por diferentes fuentes consultadas (PROMSA (García, 2004) y Servià Cantó (Casas, 2009) junto con la Universidad Politécnica de Cataluña y Britpave (2004)). Pero esta proporción se podría reducir en posteriores iniciativas ya que la resistencia que tiene que alcanzar la barrera debe ser entorno a los 25 o 30 MPa. El tipo de cemento empleado es cemento Portland con adición de ceniza volante silíceas, con clase de exposición II apta para ambientes externos y es de alta resistencia inicial (más de 20 MPa a los dos días) y con una resistencia de 42,5 MPa a los 28 días.

La cantidad final de agua del hormigón depende de la consistencia en que llegue para su puesta en obra. Según la experiencia y el criterio del encargado, asume la proporción final de agua a la mezcla para la construcción y extrusión del hormigón por el molde añadiendo la proporción de agua idónea al camión cuba. La relación agua/cemento debe fijarse en el entorno a 0,5 y no superior a 0,55 (Britpave, 2004).

La ejecución de las barreras se ha llevado a cabo mediante ponedora con encofrado deslizado, extrusionando el hormigón directamente sobre zahorra compacta (ver Figura 4.3). Todas las barreras construidas se han hecho de manera continua sin ningún tipo de junta ni tampoco ningún elemento auxiliar habitual en carreteras como pueden ser pasos de agua. De acuerdo con la normativa EN 1317 (2010), es necesario que la barrera tenga una longitud total de 60 m y que el punto de impacto se encuentre dentro del tercio central de la longitud de barrera (entre los 20 y 40 m centrales).

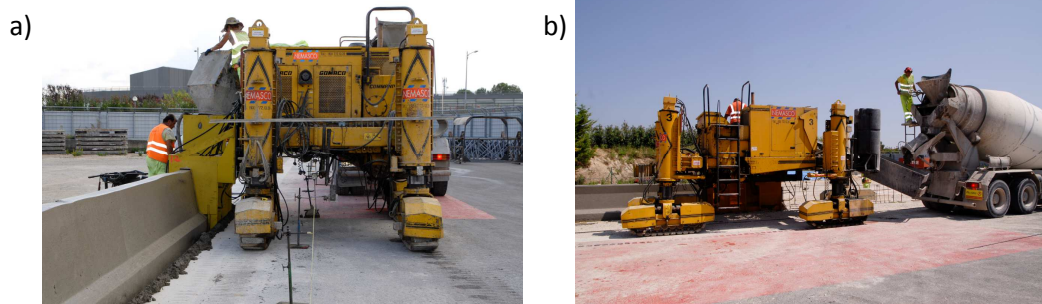


Figura 4.3. Construcción de la barrera con los perfiles 51 (a) y 119 (b).

Una vez construida la barrera, se aplica una capa de líquido de curado que impermeabiliza el hormigón y disminuye el riesgo de aparición excesiva de fisuras. Posteriormente, la barrera está lista para el ensayo de impacto cuando se alcanza una resistencia a compresión mínima del hormigón ( $f_{ck,min}$ ) que para este estudio es de 25 MPa. Ello se hace para asegurar que no se rompa la barrera cuando el vehículo impacta contra ella. Todos los ensayos de impacto se han realizado entre los 20 y 55 días de edad.

### 4.3.3- Ensayo de impacto

Una vez la barrera está lista para el ensayo de impacto se realiza previamente una inspección visual del vehículo y de la barrera. Para el caso del vehículo se revisa que se trata del mismo modelo y con las mismas características geométricas; mientras que para el caso de la barrera se mira si el acabado es liso y se aprecian coqueas o fisuras. En todos los ensayos no se ha producido ninguna anomalía destacable previo al impacto. Acto seguido, es cuando se realiza el ensayo de impacto, lanzando el vehículo contra la barrera de hormigón y, tras el impacto, el automóvil se detiene en la zona de frenado del final de la pista.

En todos los casos, la secuencia de impacto ha sido muy parecida, siguiendo un mismo patrón en el desarrollo del choque del coche. En la Tabla 4.3 se muestra la secuencia de impacto típica de cada ensayo (en este caso es el ensayo R2). A modo adicional se muestra junto a la imagen real una instantánea del ensayo simulado para poder la similitud en el comportamiento del coche ante el choque hasta el instante de los 300 ms. El modelo numérico no se simula durante más tiempo debido al elevado coste computacional.



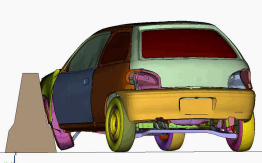

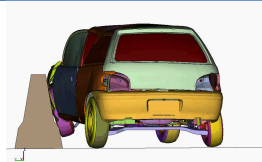



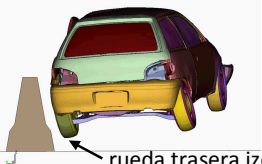



Fotograma de los dos ensayos numérico y real			
			
a) Instante inicial, antes de impactar. ( $t \approx 0$ ms)		b) ASI máximo, 1 <sup>er</sup> impacto. ( $t \approx 50$ ms)	
			
c) Rotación después del 1 <sup>er</sup> impacto. ( $t \approx 70$ ms)		d) 2 <sup>o</sup> impacto. ( $t \approx 120 - 150$ ms)	
			
e) Después del 2 <sup>o</sup> impacto, vuelo. ( $t \approx 200 - 700$ ms)		f) Contacto al suelo, aterrizaje. ( $t \approx 700 - 800$ ms)	

Tabla 4.3. Secuencia del ensayo de impacto. (Fuente. IDIADA)

Se observa que la secuencia de choque se inicia con 1<sup>er</sup> impacto de la parte frontal izquierda del vehículo. Este primer choque lo absorbe el trem de rodaje delantero, rompiendo el eje delantero del automóvil. Este impacto produce fuertes desaceleraciones que se traducen con el registro del ASI máximo de ensayo entorno a los 50 ms. Luego, el coche pivota, rotando la parte trasera del coche hacia la barrera debido al 1<sup>er</sup> impacto hasta producirse el 2<sup>o</sup> impacto entorno a los 120 a 150 ms. Este 2<sup>o</sup> impacto impulsa al vehículo a elevarse hasta dejar de contactar con la barrera. Desde los 200 ms hasta aproximadamente los 700 ms, el coche no tiene ningún contacto sobrevolando una distancia aproximada de unos 15 m. Finalmente, el vehículo impacta contra el suelo (entre los 700 y 800 ms) y se desliza hasta detenerse. Esta secuencia de choque se puede clasificar en 4 fases (1<sup>er</sup> impacto, 2<sup>o</sup> impacto, vuelo, aterrizaje).

Por otra parte, comparando las imágenes entre el ensayo real y el simulado, se aprecia una cierta semejanza del comportamiento en el choque del vehículo contra la barrera. A partir del 2<sup>o</sup> impacto, el modelo presenta diferencias sensibles con la realidad del experimento.

En el caso real, el vehículo se sigue elevando, mientras que el modelo simulado el turismo no se eleva a tanta altura. Esta diferencia de alturas es más notable en la rueda izquierda trasera (ver figura de la Tabla 4.3.e); en el caso del ensayo con el perfil R2 se registró una elevación máxima real de 0,7 m, mientras que en la simulación esta altura es de 0,2 m. Además, otra diferencia destacable es el tiempo de contacto del coche con la barrera. En el modelo numérico el coche deja de tener contacto aproximadamente a partir de los 150 ms, y en cambio en el ensayo real se da entorno a los 250 ms. Por tanto, se aprecia que el modelo numérico predice un choque más elástico que el ensayo real.

Durante la secuencia de impacto, se miden los dos índices de severidad de impacto el índice ASI y el índice THIV. Una vez finalizado el ensayo de impacto, se revisa el estado final de la barrera y del vehículo. En el caso de la barrera, en ninguno de los ensayos se ha producido ninguna deformación o deflexión, comportándose como un elemento totalmente rígido ante el choque.

#### 4.4.- VARIABLES A ANALIZAR DE CADA ENSAYO

En este apartado se presentan las variables estudiadas de cada ensayo de impacto y su razón de ser. A partir de estas variables consideradas y su posterior análisis de resultados deberá permitir:

- Detectar los comportamientos diferenciales entre ensayos.
- Entender mejor todo el desarrollo de impacto del coche sobre la barrera
- Detectar alguna tendencia que indique un aumento o disminución del ASI
- Establecer qué parámetros influyen en el vuelco

En base a estos objetivos en la Tabla 4.4 se presentan las variables a analizar de cada ensayo. En esta, se observa que las variables se dividen en tres tipos según el instante de medición: antes, durante y posterior al ensayo. Dentro de cada etapa se estudian los parámetros que pertenecen al vehículo o a la barrera. Acto seguido, se describe cada una de las variables y sus parámetros de medición. Finalmente para cada parámetro medido se le asigna una nomenclatura.

Etapas	Elemento	Variables estudiadas		Parámetro medido	Nomenclatura			
Antes del ensayo	Vehículo	Condiciones de ensayo		Velocidad	$v$			
				Ángulo de impacto	$\beta_i$			
				Masa	$M$			
				Centro de gravedad	$cdg$			
				Posición del acelerómetro	$p_a$			
	Barrera	Distancia de lanzamiento		Distancia de lanzamiento	$d_l$			
Durante el ensayo	Vehículo	Índices de severidad de impacto		ASI	ASI			
		Ejes de giro		Giro de los ejes x, y y z	$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$			
		Contrastación con el ASI de simulación		ASI de simulación	$ASI_{sim}$			
Después del ensayo	Vehículo	Posición de contacto con el suelo		Distancia transversal	$d_t$			
				Ángulo transversal	$\psi_t$			
				Longitud total	$L_t$			
	Barrera	Marcas de rozamiento	Longitudes		Longitud de remonte al plinto	$L_p$		
					Longitud de remonte después del plinto	$L_{dp}$		
					Longitud de desfase morro rueda	$L_d$		
					Longitud parte superior de la barrera	$L_s$		
					Ángulos		Ángulo remonte del plinto	$\gamma_p$
							Ángulo remonte después del plinto	$\gamma_{dp}$

Tabla 4.4. Variables a analizar para cada ensayo de impacto.

#### 4.4.1- Condiciones de ensayo

Para el ensayo TB11, la norma EN 1317 (2010) establece unas condiciones de ensayo para el vehículo delimitando unas tolerancias que se deben cumplir. En la Tabla 4.5 se exponen los parámetros considerados, el valor estándar de ensayo, el rango de valores que permite la normativa y el valor modificado de ensayo para obtener el menor ASI posible.

Como se puede ver, los parámetros estudiados son la  $v$ , el  $\beta_i$ , la  $M$ , el  $cdg$  y la  $p_a$ . A continuación a la descripción de cada uno de los parámetros considerados para su modificación para el ensayo de impacto, se presentan los resultados de la simulación para ver qué afectación tienen en el ASI de simulación.

Parámetro		Valor estándar	Tolerancias	Valor estándar modificado	Unidades
Velocidad		100	100 a 107	102	Km/h
Ángulo		20	19 a 21,5	19	º
Masa		900	± 40	940	Kg
Centro de gravedad	Eje X	0,90 (desde el eje delantero)	± 0,09	0,99	m
	Eje Y	0,00 (en la línea central)	± 0,07	0,00	m
	Eje Z	0,49 (desde el suelo)	± 0,049	0,49	m
Posición del acelerómetro	Eje X	$x_{cdg}$	± 0,07	1,06	m
	Eje Y	$y_{cdg}$	± 0,04	0,00	m
	Eje Z	$z_{cdg}$ (proyección vertical del cdg)	-	0,49	m

Tabla 4.5. Tolerancias de los parámetros considerados.

Velocidad y ángulo de impacto

De acuerdo con la normativa vigente, estas dos variables van relacionadas según el valor que se considere de cada una. En la Figura 4.4 se presenta el rango de valores que se debe cumplir para el ensayo. En el eje de abscisas representa el valor del ángulo de impacto ( $\beta_i$ ) y el eje de ordenadas, la velocidad (v). El par de valores del ensayo se debe encontrar dentro de la marca delimitada. Como se puede ver, el rango del valor de los ángulos es entre 19º y 21,5º; mientras que para las velocidades se encuentra que los 100 Km/h y los 107 Km/h.

La pregunta que se suscita es qué par de valores es más ventajoso para obtener un ASI más bajo. Desde el punto de vista energético, el vehículo impacta contra la barrera con una cierta energía cinética ( $E_{cin}$ ). Parece lógico pensar que cuánta menor sea la energía de impacto, menor será la severidad de impacto. Por tanto, el objetivo es encontrar el par de valores que minimice la energía cinética.

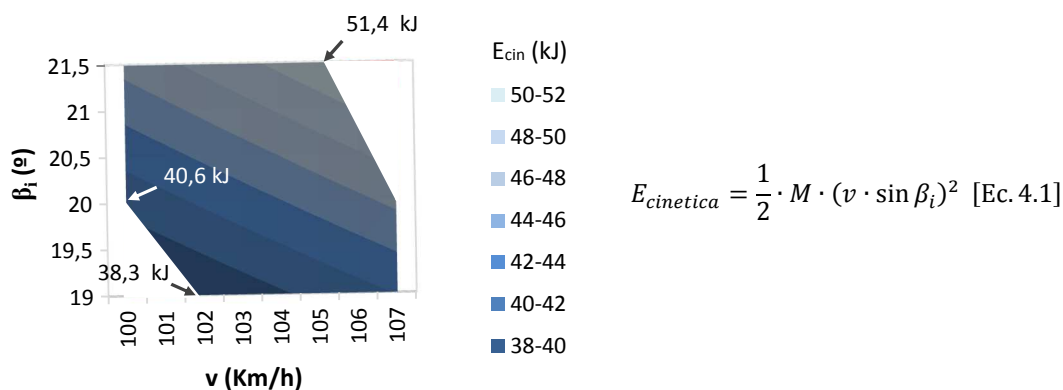


Figura 4.4. Tolerancias de ensayo para la velocidad y ángulo de impacto.



Tal y como se observa en la Figura 4.4, se visualiza que para  $v = 102 \text{ Km/h}$  y  $\beta_i = 19^\circ$  se da la menor energía cinética con un registro de 38,3 kJ. En cambio en el otro extremo, con  $v = 105 \text{ Km/h}$  y  $\beta_i = 21,5^\circ$ , se registra la mayor energía de impacto con un valor de 51,4 kJ, siendo este un 134 % superior al valor mínimo. Analizando los valores estándar de ensayo, con una velocidad de 100 Km/h y con un ángulo de  $20^\circ$ , da lugar una energía de impacto de 40,6 kJ; valor próximo a la energía cinética mínima.

Por tanto, se concluye que existen variaciones de energía de cinética significativas según el par de valores que se escoja. El par de valores nominal más óptimo es para una velocidad de 102 Km/h y un ángulo de  $19^\circ$ .

#### Masa y posición del centro de gravedad

En la Figura 4.5 se muestra la posición del centro de gravedad mediante un dibujo del coche con las direcciones de los ejes y tolerancias que permite la normativa vigente. El centro de masas se deberá encontrar: en dirección X a 0,90 m  $\pm$  10% respecto al eje de las ruedas delanteras del vehículo, un intervalo de  $\pm$  0,07 m respecto al plano medio del coche en el eje Y; y 0,49 m  $\pm$  10% respecto al nivel de suelo en el eje Z.

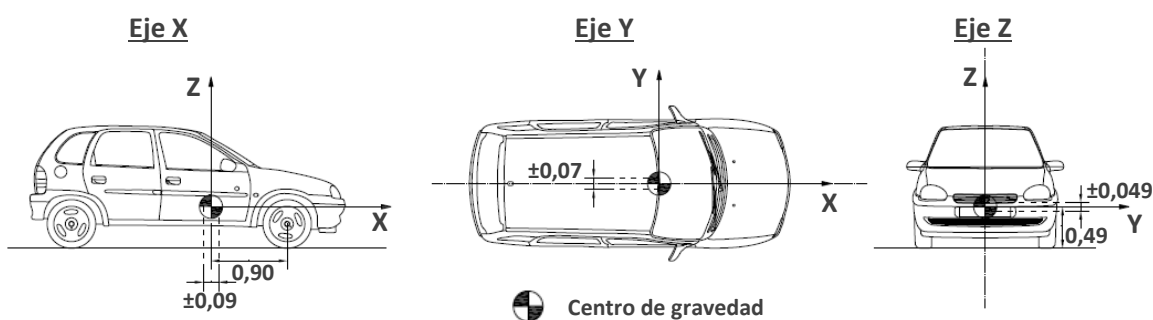
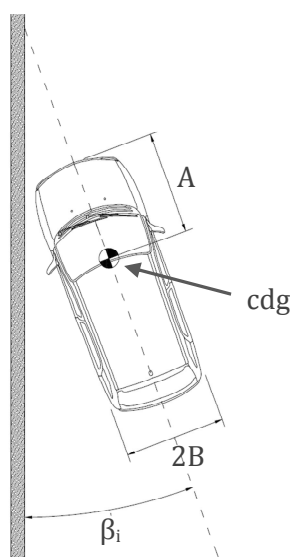


Figura 4.5. Posición del centro de gravedad y sus tolerancias.

A priori no se sabe cuál es la posición más óptima para poder reducir el ASI. Pero a partir de la fórmula expuesta por Olson et al. (1970) (ver ecuación 4.2) se puede calcular la fuerza de impacto dependiendo entre varias variables, la posición de dicho centro. En la Figura 4.6 se expone la fórmula referida con un dibujo esquema de las variables consideradas. En ella, se observa que cuánta mayor sea la distancia frontal del vehículo respecto al centro de masas (G), menor será la fuerza de impacto y por consiguiente una menor severidad de impacto. Por tanto, es interesante posicionar el centro de masa lo más alejado posible del frontal. Respecto al posicionamiento idóneo en direcciones Y y Z, no se tiene constancia de ninguna recomendación al respecto.

En base a la formulación planteada por Olson, se realiza un estudio paramétrico de los valores de aceleración y fuerza lateral con los valores geométricos del vehículo utilizado y las condiciones de ensayo TB11 de la norma EN1317 (2010).



$$F = M \cdot a_{lat} \quad [Ec. 4.2]$$

$$F = \frac{M \cdot (v \cdot \sin \beta_i)^2}{2 \cdot [A \cdot \sin \beta_i + (\cos \beta_i - 1) \cdot B + D_r]} \quad [Ec. 4.3]$$

$F$  = fuerza de impacto

$a_{lat}$  = aceleración lateral

$A$  = distancia frontal al centro de gravedad

$2B$  = anchura total del vehículo

$D_r$  = deformación de la barrera tras el impacto

Figura 4.6. Dibujo con las variables consideradas de la fórmula de impacto de Olson.

En la Tabla 4.6 se presentan 7 casos diferentes donde se agrupan en 3 grupos. En los casos C1, C2 y C3 se analizan la variación de la aceleración y fuerza lateral según la posición del cdg con las condiciones de ensayo estándar ( $v = 100$  Km/h,  $\beta_i = 20^\circ$ ). Los casos C4, C5 y C6 son análogos a los 3 casos anteriores (C1, C2 y C3) pero con las condiciones de ensayo modificadas ( $v = 102$  Km/h,  $\beta_i = 19^\circ$ ) de acuerdo con el par de valores  $v$  y  $\beta_i$  que dan una menor energía cinética.

Finalmente, el caso C7 es una modificación del caso C5 pero con una masa total de 940 Kg. Este caso (C7) se estudia ya que retrasar el centro de gravedad en la dirección X es necesario aumentar la masa del vehículo en la parte trasera del mismo mediante la colocación de pesos. En todos los casos, se ha considerado que la deformación de la barrera es nula.

Caso	$v$ (Km/h)	$\beta_i$ (°)	A (m)	2B (m)	$D_r$ (m)	M (Kg)	$a_{lat}$ (m/s <sup>2</sup> )	F (kN)
C1	100	20	1,5	1,49	0	900	96,4	86,8
C2	100	20	1,59	1,49	0	900	90,5	81,4
C3	100	20	1,41	1,49	0	900	103,2	92,9
C4	102	19	1,5	1,49	0	900	95,0	85,5
C5	102	19	1,59	1,49	0	900	89,2	80,3
C6	102	19	1,41	1,49	0	900	101,7	91,5
C7	102	19	1,59	1,49	0	940	89,2	83,8

Tabla 4.6. Valores de  $a_{lat}$  y  $F$  de 7 casos.

Para los casos C1, C2 y C3, cuando mayor es la distancia A, menor es la aceleración lateral ( $a_{lat}$ ) y consecuentemente menor es la fuerza lateral de impacto (F). Para los casos C4, C5 y C6 se produce la misma tendencia apreciada para los 3 casos anteriores. En todos los casos se cuantifica que retrasando 9 cm la posición del cdg implica una reducción entorno al 6 - 7 % los valores de aceleración y fuerza laterales. De este modo, es recomendable alejar el cdg del frontal del vehículo.

Comparando los resultados del primer grupo (C1, C2 y C3) con condiciones de ensayo estándar, con los del segundo (C4, C5 y C6) con condiciones de ensayo modificados, se aprecian disminuciones muy pequeñas en los valores de  $a_{lat}$  y de F con reducciones entre 1 y 2 % (entre C1 y C4, C2 y C5, C3 y C6). Por tanto, aunque no son muy significativas las variaciones de resultados con las condiciones de ensayo modificado, sí que contribuyen a disminuir la fuerza de impacto.

Por último, evaluando el resultado de C7 (comparando con el C5) se observa que el aumento de 40 Kg en la masa total, implica un aumento de la fuerza de impacto de 4,4 %. En cambio, la variación de la masa no afecta a la  $a_{lat}$ . Si se compara con el C1 (ensayo estándar), las reducciones de C7 son de 7,5 % de la  $a_{lat}$  y de 3,5 % de la F; y comparando con el C4 (no retrasar el cdg sin aumento de masa) disminuye un 6,1 % de la  $a_{lat}$  y de un 2 % de la F. Por tanto, atrasar el cdg, aunque implique un aumento de peso, resulta más ventajoso que en caso de no hacerlo.

#### Posición del acelerómetro

Otra de las variables consideradas es el posicionamiento del acelerómetro respecto al centro de masas del vehículo. Según la norma EN1317 (2010), se exige que el acelerómetro debe posicionarse respecto del centro de masas en  $\pm 70$  mm en el eje X y  $\pm 40$  mm en el eje Y. A priori se desconoce cuál es aquella posición que conduce al menor ASI. Pero en base a la literatura técnica, Calamani et al. (2007) afirman que en base a la experiencia adquirida, retrasar el acelerómetro en 4 cm en el eje X puede dar resultados diferentes de ASI. Por tanto, es interesante proponer el acelerómetro lo más retrasado posible del centro de gravedad (a 7 cm).

#### Estudio de sensibilidad de los parámetros considerados

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados ASI simulados obtenidos con el perfil 51 para 4 casos diferentes al ensayo de referencia (51SR) variando el ángulo y la velocidad de impacto, la masa del vehículo y la posición del acelerómetro en la dirección longitudinal x. En los 4 casos planteados para la simulación, el aumento de masa de 40 Kg respecto al 51SR no ha modificado la posición del cdg. La nomenclatura utilizado corresponde a las dos primeras cifras el perfil ensayado (el 51), seguido de una S (Simulación) y de la letra R (ensayo de Referencia) o número (casos del 1 al 4).

De los resultados de la Tabla 4.7 se deduce que los cambios propuestos sobre el ensayo de referencia conducen a valores ASI de hasta una variación de ASI de hasta el 11 %. Se observa que el factor más determinante es la posición del acelerómetro. Fijándose en los dos par de

ensayos (51S1 y 51S2; 51S3 y 51S4), el hecho de retrasar 7 cm el acelerómetro manteniendo las demás variables intactas, implica descensos de ASI de entre 0,12 y 0,13. En menor medida la otra variable que afecta el valor de ASI es el ángulo de impacto. Disminuir el ángulo de impacto de 20° a 19° (par de ensayos: 51S1 y 51S3, 51S2 y 51S4) conduce a descensos del ASI entre 0,05 y 0,07. En cambio, los aumentos de un 4,4 % de la masa (40 Kg) y de un 2 % de la velocidad (2 Km/h) (comparación entre los ensayos 51SR y 51S1) se aprecia poca afectación en el ASI, con sólo un registro de 1,3 % superior. Con estos resultados, el ensayo 51S4 es el que mejor ASI ha obtenido con un ASI = 1,37.

Parámetro	51SR	51S1	51S2	51S3	51S4
$\beta_i$ (°)	20	20	20	19	19
v (Km/h)	100	102	102	102	102
M (Kg)	900	940	940	940	940
$p_a$ (mm)	0	0	-70	0	-70
ASI	1,54	1,56	1,44	1,50	1,37

Tabla 4.7. Resultados de las modificaciones sobre el ensayo de referencia.

#### 4.4.2- Distancia de lanzamiento

Otra de las variables que se ha tenido en cuenta para este análisis es la distancia de lanzamiento ( $d_i$ ) del vehículo desde el final del rail donde se lanza el coche hasta impactar contra la barrera. Se ha considerado esta variable porque en todos los ensayos esta distancia varía y puede ser susceptible a influir en los resultados obtenidos.

En la Figura 4.7 se observa la longitud que se ha medido. En la misma, se aprecia que se ha tomado la distancia de lanzamiento desde el rail más cercano a la barrera hasta la base del perfil como criterio común para seguir su evaluación. Además, también se muestra el ángulo de impacto, cuyo valor se ha revisado por si en algún ensayo no lo hubiese cumplido.



Figura 4.7. Medición distancia de lanzamiento.

#### 4.4.3- Índices de severidad de impacto

Tanto el índice ASI como el índice THIV son los parámetros que determinan el nivel de seguridad de la barrera de acuerdo con el dictamen de la norma EN 1317, por lo que representa como los indicadores de seguridad que puede ofrecer una barrera de contención. A partir de estos dos índices se podrá determinar cuál perfil obtiene los resultados más bajos.

Es importante resaltar que la evolución del ASI está asociada a los principales instantes de impacto que explican cómo se comporta el vehículo. En la Figura 4.8 se aprecian 4 fases del choque que corresponden: fase I (de 0 a 100 ms), un 1<sup>er</sup> impacto de la parte delantera del coche; fase II (de 100 a 200 ms), un 2<sup>o</sup> impacto de la parte trasera del coche; fase III (de 200 a 700 ms), vuelo del coche posterior al 2<sup>o</sup> impacto; y, fase IV (de 700 ms a 850 ms), aterrizaje en el suelo.

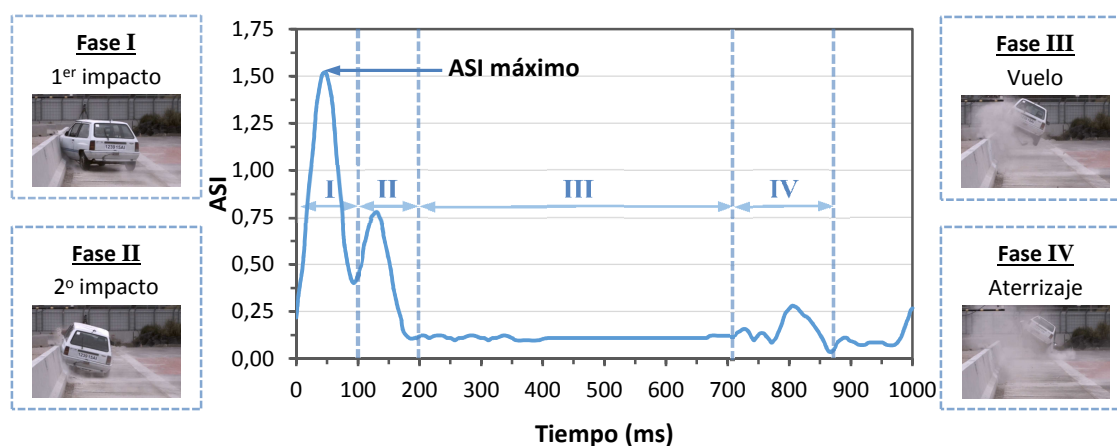


Figura 4.8. Evolución del ASI durante el impacto (ensayo 51 2<sup>o</sup>).

De acuerdo con estas 4 fases el índice ASI sigue una misma tendencia en todos los ensayos de impacto. En la fase I se encuentra el 1<sup>er</sup> pico ASI alrededor de los 50 ms. En este instante es donde se produce el ASI máximo de ensayo y es el valor que se debe tener en cuenta para determinar la clase de barrera de acuerdo con la norma EN1317. Después de este 1<sup>er</sup> impacto se produce un descenso y vuelve a ascender hasta producirse el 2<sup>o</sup> pico ASI alrededor de los 120 a 150 ms (fase II). Este segundo repunte del ASI es aproximadamente del orden entre 1/3 y la 1/2 del valor del 1er pico ASI. Luego, el ASI vuelve a descender y se estabiliza a desde los 200 ms hasta los 700 ms (fase III). Finalmente, en la fase IV se produce un nuevo repunte del ASI y posteriormente descender nuevamente.

#### 4.4.4- Contrastación con los resultados numéricos

En este análisis de contrastación de resultados del modelo numérico con los del ensayo real, se compara la evolución de las aceleraciones en las direcciones X, Y, Z y del índice ASI durante el tiempo de impacto del vehículo con la barrera. En la Tabla 4.8 se presentan las evoluciones de las aceleraciones y del ASI hasta al instante de los 200 ms del ensayo Inicial como ejemplo del método seguido.

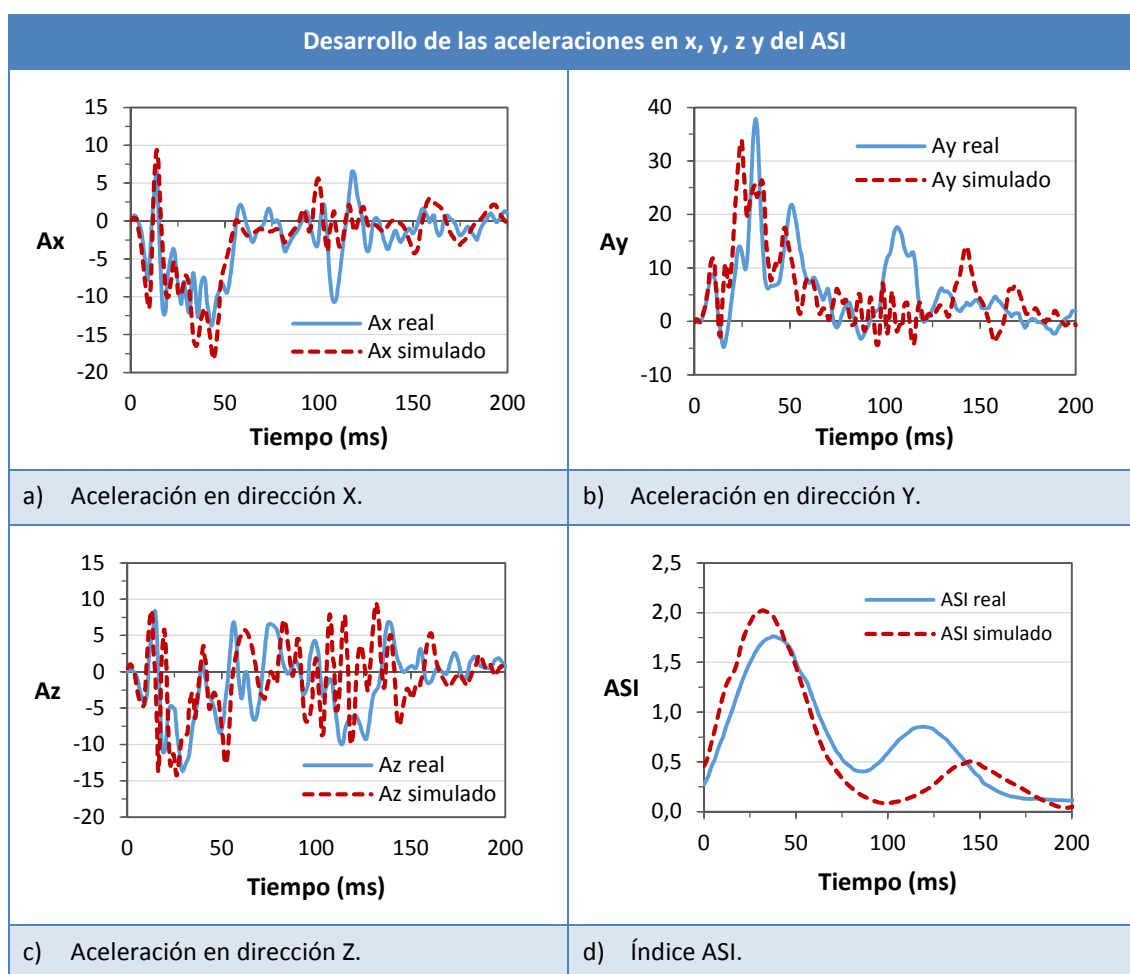


Tabla 4.8. Desarrollo de las aceleraciones (X, Y, Z) y ASI del ensayo real y simulado del perfil R2.

Como se puede ver, el ensayo real está representado en color azul (continuo) y el ensayo simulado numéricamente en color rojo (discontinuo). En ella, se observa que a pesar de que existe una cierta semejanza entre las aceleraciones del ensayo real y del simulado a lo largo del choque, se aprecian repuntes o desfases, algunos de ellos bastante dispares. Este hecho se repite en los demás ensayos. En este sentido, cuando en el modelo se reproducen las aceleraciones en X, Y y Z se deben vigilar las diferencias en sus desarrollos en el tiempo con los medidos con el ensayo real, ya que pueden contribuir un cambio notable en el índice ASI real.

En cuanto a los valores del ASI, se aprecia un cierto desajuste en los dos picos principales. En todos los ensayos, el primer pico del ASI de simulación se asemeja con el real (con errores inferiores al 16 % del valor ASI y un desajuste máximo en el tiempo de 17 ms de los resultados de simulación respecto al real), pero en cambio hay una gran diferencia con el segundo pico ASI (con errores de hasta del 35 % del valor ASI y un desajuste máximo en el tiempo de 25 ms). De este modo, se visualiza que el ASI de simulación va distando del real a medida que va avanzando en el tiempo.

#### 4.4.5- Posición de contacto con el suelo

En la Figura 4.9 se presenta la medición de la distancia transversal ( $d_t$ ) entre el punto de contacto del coche con el suelo respecto a la barrera; y, el ángulo transversal del coche ( $\Psi_t$ ) respecto de la horizontal, justo en el momento en el que el vehículo contacta con el suelo una vez ya ha impactado contra la barrera.



Figura 4.9. Medición de la distancia y ángulo transversales.

La medición de la distancia transversal ( $d_t$ ) permite saber el rebote producido por el impacto del vehículo contra el perfil. Es de suponer que cuánto más vertical sea el perfil, más rebotará el coche y mayor será esta longitud. En referencia al ángulo transversal ( $\Psi_t$ ), se mide el grado de rotación que ha experimentado el coche tras el impacto hasta contactar con el suelo. La medición de este ángulo puede ser de ayuda para ver en qué casos se produce el vuelco. Cuanto mayor sea este ángulo, mayor probabilidad de que se produzca el vuelco. Además, será importante ver si existe una relación entre ( $d_t$ ) y ( $\Psi_t$ ).

#### 4.4.6- Ejes de giro

En el ensayo de impacto, aparte de las mediciones de las aceleraciones en las 3 direcciones, también se miden las velocidades de giro correspondiente a cada eje. Sobre cada eje de giro, da la información de cómo rota el vehículo. En la Figura 4.10, se muestra el vehículo y los 3 ejes de giro con su sentido positivo.

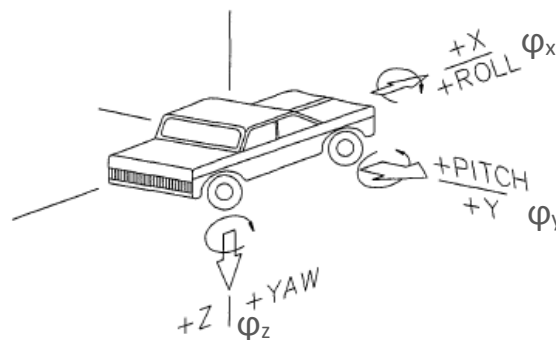


Figura 4.10. Ejes de giro y su sentido positivo adoptado.

El giro alrededor del eje X ( $\varphi_x$ ) es la rotación que influye en el vuelco del vehículo. Cuanto mayor sea la velocidad de giro y mayor sea el ángulo de inclinación, mayor probabilidad de vuelco. Por lo que hace a la rotación alrededor del eje Y ( $\varphi_y$ ), es el que determina el grado de inclinación del coche. Según el tipo de perfil de barrera, puede facilitar en mayor o menor medida una mayor elevación del morro del vehículo durante el impacto. El tercer eje de giro es el correspondiente al eje Z ( $\varphi_z$ ), este eje de rotación permite saber cómo rota el coche después del primer impacto para luego chocar con la parte trasera y posteriormente ver cuál es el sentido de dirección que tiene el vehículo tras el impacto.

Para cada ensayo, el desarrollo de giro cada uno de los 3 ejes siguen un mismo patrón de acuerdo con la secuencia de impacto. En la Figura 4.11 se muestra la evolución tipo que sigue cada eje de giro delimitando las 4 fases presentes en el ensayo de impacto.

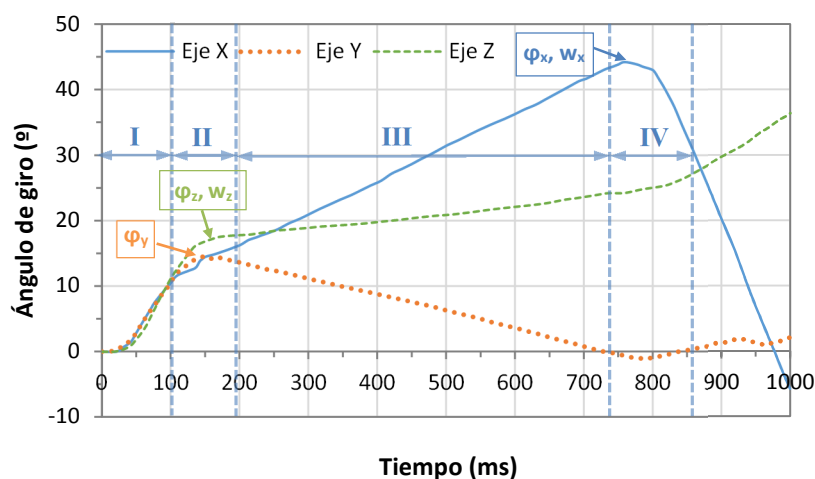


Figura 4.11. Evolución de los giros en los ejes X, Y y Z. (ensayo 51 2°)

En cada fase se observa un cambio en el comportamiento del giro. En la 1ª fase (1º impacto con la parte delantera del coche) se produce un fuerte aumento de los 3 giros hasta los 100 ms; mientras que, en la 2ª fase (2º impacto con la parte trasera del coche) hay un cambio brusco de la pendiente, disminuyendo el crecimiento del giro  $\varphi_z$  y en menor medida del giro  $\varphi_x$ ; y cambiando el signo del giro  $\varphi_y$ . Acto seguido, en la 3ª fase (vuelo) las velocidades de giro se estabilizan. Finalmente, en la 4ª fase (3º impacto correspondiente al aterrizaje) se produce un cambio brusco de los 3 giros debido al impacto contra el suelo.

En la Figura 4.12.a se muestra la medición del ángulo de rotación  $\varphi_x$  y la velocidad angular  $w_x$  en el instante que el vehículo contacta con el suelo después de impactar contra la barrera.

En la Figura 4.12.b se presenta en el mismo instante, los momentos que actúan sobre el coche respecto al punto P. Junto a la Figura 4.12.b se exponen las ecuaciones (desde 4.5 hasta 4.7) del sumando de momentos.



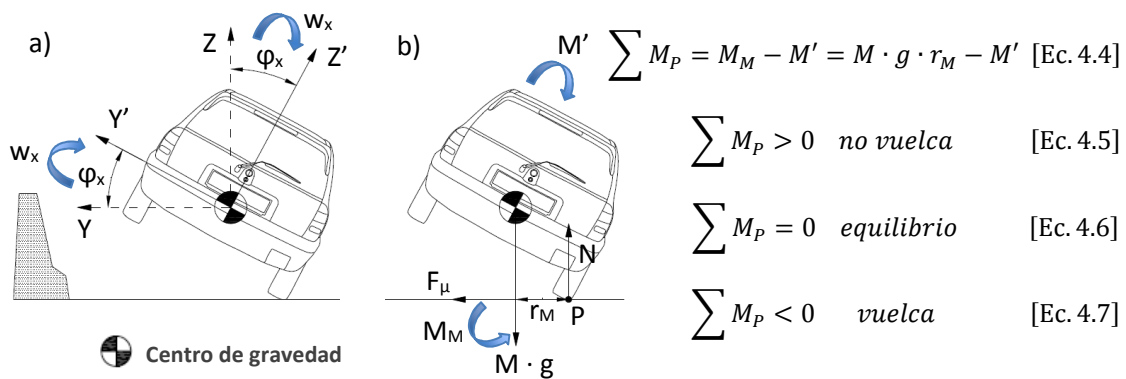


Figura 4.12. Medición de  $\phi_x$  y de  $w_x$  (a) y cálculo de los momentos actuantes (b).

Tal y como se observa en la Figura 4.12.a, el ángulo y la velocidad de giro se miden en base a los ejes Y'- Z' respecto a la posición inicial de los ejes Y - Z. Los valores de estos dos parámetros dependerá del par de fuerzas actuantes del coche en el instante de contacto con el suelo en el punto P ( ver Figura 4.12.b).

Por un lado, actúa el momento asociado al giro alrededor del eje X dado por el impacto del vehículo contra la barrera con un sentido negativo al momento P posibilitando al vuelco; y por otro lado, se encuentra la fuerza ejercida por el peso del coche ( $M \cdot g$ ) que ejerce como fuerza estabilizadora frente al vuelco con un sentido positivo al momento P. Por tanto, la medición del ángulo de  $\phi_x$  y la velocidad de giro  $w_x$  (ver Figura 4.11) deben permitir discernir qué valores dan como resultado el vuelco del vehículo.

En la Figura 4.13 se muestra la medición del ángulo  $\phi_y$  (a) y del ángulo  $\phi_z$  y la velocidad de giro  $w_z$  (b). El valor de  $\phi_y$  determina el grado de inclinación máximo del morro del vehículo durante el impacto. Cuanto mayor sea este ángulo, el coche tendrá mayor tendencia a elevarse. Respecto a los valores de  $\phi_z$  y  $w_z$ , se toman una vez se ha producido el 2º impacto (ver Figura 4.11) para medir el mayor o menor grado de redirección del coche tras el impacto.

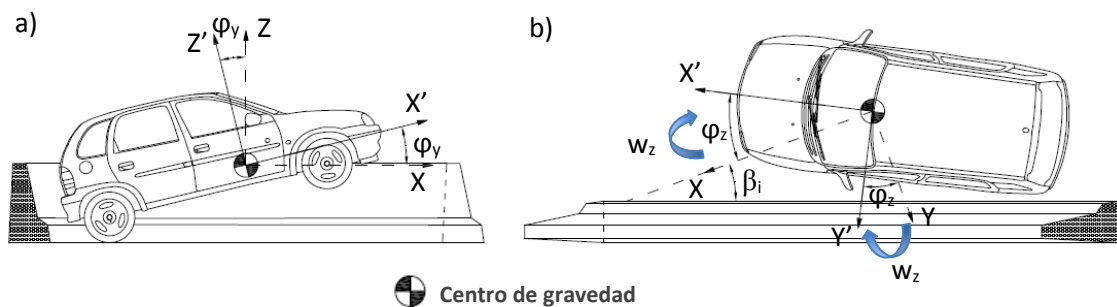


Figura 4.13. Medición de  $\phi_y$  (a); y de  $\phi_z$  y  $w_z$  (b).

#### 4.4.7- Marcas de rozamiento

Después de cada ensayo de impacto, en la barrera se queda la marca de rozamiento dejada por el vehículo. En todos los ensayos, se aprecia una forma de rozamiento bastante

común en todos ellos, donde se repite el mismo patrón en la forma del rozamiento según el tipo de perfil. Básicamente, para poder discernir cuáles son estas diferencias y similitudes entre los ensayos, se ha medido en cada ensayo por un lado, las longitudes totales de rozamiento y por otro, los ángulos de inclinación de dicho rozamiento (ver Figura 4.14).

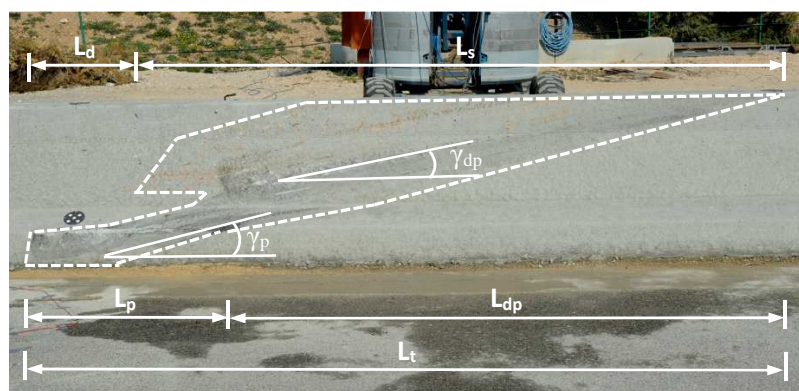


Figura 4.14. Longitudes y ángulos de rozamiento del vehículo sobre la barrera.

Las longitudes que se miden son en el sentido longitudinal a la barrera y se subdividen según la forma patrón de impacto. Estas longitudes medidas son: la longitud total de la marca ( $L_t$ ), la longitud de remonte sobre el plinto ( $L_p$ ), la longitud tras superar el plinto ( $L_{dp}$ ), la longitud de la parte superior de la barrera ( $L_s$ ) y la longitud de desfase entre la marca de la rueda y el morro del vehículo sobre la barrera ( $L_d$ ). En referencia a los ángulos de inclinación se miden dos ángulos respecto a la horizontal: el ángulo de remonte del plinto ( $\gamma_p$ ) y el ángulo después del remonte del plinto ( $\gamma_{dp}$ ).

La **longitud total** ( $L_t$ ) corresponde a la medición total de la marca que ha dejado el coche sobre la barrera. Cuanto más larga sea esta longitud, mayor será el rozamiento entre el vehículo y la barrera. Es de esperar que los perfiles más verticales, menos adaptados a la forma del morro del vehículo, el deslizamiento sea menor dando lugar a una longitud total menor.

La **longitud de remonte en el plinto** ( $L_p$ ) es la distancia producida por el deslizamiento de la rueda sobre el plinto. Cuanto más larga sea esta distancia, más dificultad ha encontrado el vehículo para superar dicho obstáculo, y, por tanto, más difícil poder remontar sobre la barrera.

La **longitud de remonte después del plinto** ( $L_{dp}$ ), da la información de la longitud de deslizamiento que ha experimentado el vehículo una vez la rueda ha superado el plinto. Esta huella pertenece tanto a la rueda como a la parte frontal y lateral izquierdo de la carrocería del coche. Esta longitud permite saber si el vehículo en esta zona ha deslizado en mayor o menor medida según el ángulo de inclinación adoptado en el perfil de la barrera ensayada. Es de suponer que cuanto más vertical sea el perfil en esta zona, menor será dicha distancia.

La **longitud de la parte superior de la barrera** ( $L_s$ ) es la distancia total de rozamiento dejada por el vehículo en toda la parte superior de la barrera. Este rozamiento empieza con la parte del morro del coche y le sigue la parte lateral y de la rueda del coche tras superar el plinto.

La **distancia de desfase de la rueda - morro** ( $L_d$ ), pertenece a la longitud donde no existe ninguna marca de rozamiento cuando existe un contacto de la rueda con el plinto, pero por el contrario no existe contacto con el morro del vehículo. Cuanto mayor sea la distancia horizontal de la zona de transición entre el plinto y la parte superior de la barrera (parámetro  $g$ ) es de esperar que esta distancia de desfase sea mayor.

El **ángulo de remonte del plinto** ( $\gamma_p$ ) determina la mayor o menor facilidad de subida del coche por el plinto. Cuanto menor sea la altura y el grado de inclinación del plinto, mayor será este ángulo.

El **ángulo después del remonte del plinto** ( $\gamma_{dp}$ ) registra el deslizamiento del vehículo por la parte superior de la barrera. Dependiendo del grado de inclinación de esta parte del perfil, el ángulo será mayor o menor.

#### 4.5.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO

Una vez descrito el modo de análisis de las variables a estudiar, se presentan los resultados de los 8 ensayos de impacto realizados en esta serie. A continuación se muestran los análisis de los siguientes parámetros:

- Distancias de lanzamiento del vehículo
- Índices ASI y THIV
- Posición de contacto con el suelo
- Ejes de giro durante el impacto
- Marcas de rozamiento

##### 4.5.1- Distancias de lanzamiento del vehículo

En la Tabla 4.9 se presentan las distancias de lanzamiento de cada uno de los ensayos y su ASI asociado, además de la velocidad de choque. En dicha tabla se aprecian diferencias en las distancias de lanzamiento de los ensayos. Desde los 11,8 m del perfil Inicial hasta los 3,3 m de los perfiles Inglés y 119. Estas diferencias responden a criterios de espacio de la misma pista de ensayo para no entorpecer otros ensayos ajenos al de esta tesis en los ensayos de los perfiles R2, 51<sup>er</sup> y 51°. En el caso del ensayo del perfil 51 3<sup>er</sup>, la distancia de 3,9 m frente a los 3,3 m habituales responden a razones constructivas de la barrera para que el ángulo de impacto sea de 19°. Para evitar posibles imprecisiones desde el desenganche de la lanzadera hasta el impacto contra la barrera se debe exigir una superficie totalmente lisa sin ningún elemento del suelo que pueda entorpecer el sentido de dirección del vehículo cuando este se lanza.

Perfil de ensayo	ASI	$d_i$ (m)	v (Km/h)
R1	1,88	3,3	100,6
R2	1,72	11,8	102,8
51 1 <sup>er</sup>	1,62	8,9	100,0
51 nulo	-	8,9	-
51 2 <sup>o</sup>	1,52	8,9	100,0
73	1,64	3,4	100,0
119	1,62	3,3	100,8
51 3 <sup>er</sup>	1,43	3,9	100,0

Tabla 4.9. Distancias de lanzamiento. (Fuente: IDIADA)

Con el fin de que la velocidad de impacto en el momento de contacto con la barrera sea de 100 Km/h, es necesario lanzar a una mayor velocidad desde el instante que se desengancha el vehículo de la lanzadera para paliar el rozamiento del suelo y el aire. En la citada Tabla 4.9 se muestra que el rango de error de las velocidades es 0,0 % hasta +2,8 %. Este intervalo de velocidades con un ángulo de impacto de 20° (excepto al perfil 51 3<sup>er</sup> con uno de 19°) entran dentro de los límites establecidos en la norma EN 1317 (2010).

Aparte de estas dos consideraciones ya previstas en cada uno de los ensayos. También se ha revisado en cada uno de los videos correspondientes a cada ensayo, si ha habido alguna imprecisión o desvío destacable del vehículo durante el recorrido de esta distancia de lanzamiento, no habiéndose detectado ninguna anomalía.

#### 4.5.2- Índices ASI y THIV

En la Figura 4.15 se muestra las evoluciones del índice ASI (real y simulado) y del índice THIV de los 7 ensayos de impacto. Los perfiles se han ordenado por orden de aparición, empezando con el perfil CSB de referencia (R1), seguido del perfil Inicial (R2) y de los perfiles 51 (1<sup>er</sup> y 2<sup>o</sup> ensayo), 73, 119; y finalmente el 3<sup>er</sup> ensayo del perfil 51. En la misma se presenta en el lado izquierdo los valores del índice ASI y a la derecha los del índice THIV. También se ha añadido los límites ASI = 1,4 y THIV = 33 Km/h que indican una barrera de clase B (EN 1317).

En esta figura se observa que a medida que se avanza los ensayos y consecuentemente mejora el conocimiento, hay una cierta tendencia a la baja del índice ASI. La evolución que ha seguido el ASI es el siguiente: en base al perfil R1 (ASI de 1,9) se ha propuesto el perfil R2 como punto de partida de este estudio con un valor ASI de 1,7; posteriormente se ha ido la forma del perfil alcanzando ASIs entorno del 1,5 a 1,6 (perfiles 51, 73 y 119). Viendo la gran dificultad de mejorar el valor ASI, se han modificado las condiciones de ensayo con el perfil 51, llegando a un ASI de 1,4 (ensayo 51 3<sup>er</sup>). Este valor entra dentro de la clasificación de barreras de clase B si no fuera porque el ensayo no es válido ya que el vehículo volcó.

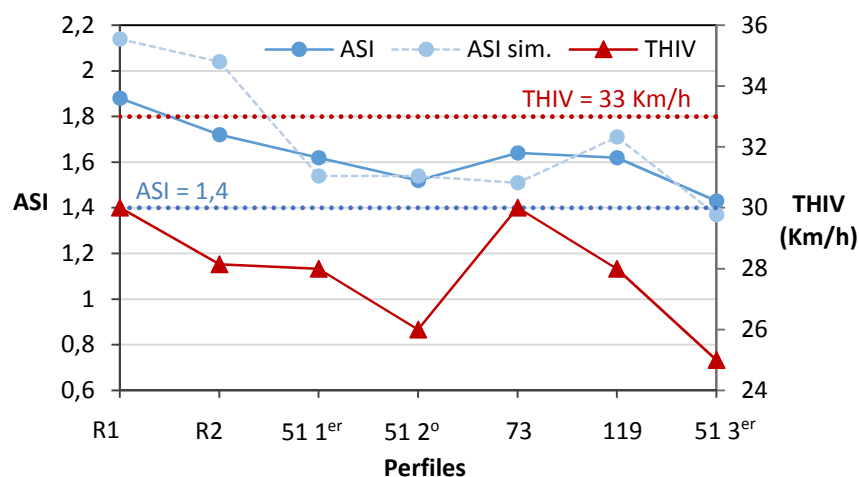


Figura 4.15. Resultados ASI y THIV de los 7 ensayos de impacto.

Respecto al índice THIV se aprecia un cierto descenso del THIV a medida que se ha ido avanzando en los ensayos de modo parecido a la evolución del ASI pero con la excepción del valor THIV del perfil 73. En este caso, se ha registrado un valor THIV superior a lo esperado, siendo un valor superior al medido con el perfil R2 e igual al perfil R1. La razón de este repunte puede asociarse a que la forma del perfil 73 induce a una mayor velocidad lateral de la cabeza del maniquí contra la luna. Por otra parte, se destaca que todos los resultados se encuentran entre un 10 % y 25 % por debajo de los 33 Km/h.

En referencia a la contrastación de los resultados ASI reales con los resultados de las simulaciones, se aprecia una tendencia a converger los dos ASIs a medida que progresa los ensayos. Ello es a consecuencia, entre otros factores, a la mejora del modelo de simulación como retroalimentación de los ensayos anteriores. De este modo se visualiza que los valores ASI del modelo se asemejan con los del ensayo de impacto con un intervalo de confianza de  $\pm 0,1$ .

#### 4.5.3- Posición de contacto con el suelo

En la Tabla 4.10 se muestran los resultados medidos de las distancias ( $d_t$ ) y de los ángulos ( $\Psi_t$ ) transversales de los 7 ensayos más el ensayo nulo del perfil 51. Además, en ella se ha añadido los resultados ASI de cada ensayo y de si se ha producido el vuelco.

Analizando las distancias transversales ( $d_t$ ) se observa un cierto decrecimiento a medida que ha ido evolucionando el perfil. Desde los 2,4 m del perfil R2 se ha reducido hasta valores por debajo de 1 m (reduciendo entre esta un 60 y 70 % del valor del perfil R2). Por tanto, de esta manera se cumple el comportamiento esperado de que cuánto más vertical sea el perfil, más rebota el vehículo. Hay que destacar el resultado del perfil R1, en que el primer contacto del vehículo con el suelo es con la rueda izquierda de la parte del conductor en vez de la rueda derecha de la parte del copiloto como los demás ensayos de impacto de esta tesis. Este hecho parece indicar un giro de rotación opuesto a los demás perfiles.

Perfil de ensayo	ASI	$d_t$ (m)	$\Psi_t$ (°)	Vuelco
R1	1,88	1,2	-21	No
R2	1,72	2,4	27	No
51 1 <sup>er</sup>	1,62	1,5	38	No
51 nulo	-	1,8	26	No
51 2 <sup>o</sup>	1,52	1,5	40	No
73	1,64	0,7	79	Sí
119	1,62	1,0	45	Sí
51 3 <sup>er</sup>	1,43	0,9	86	Sí

Tabla 4.10. Resultados de distancias y ángulos transversales.

Evaluando los ángulos transversales ( $\Psi_t$ ) se ve una tendencia a incrementar el ángulo a medida que se ha avanzado en la campaña de ensayos, desde un valor negativo del perfil R1 hasta valores de 79° y 86° de los perfiles ensayados 73 y 51 3<sup>er</sup> respectivamente. El valor negativo del perfil R1 ( $\Psi_t = -21^\circ$ ) se debe a que el vehículo rota en el sentido contrario. En cambio, el perfil R2 registra un valor positivo ( $\Psi_t = 27^\circ$ ) con lo que se puede interpretar que existe una forma de perfil intermedia entre R1 y R2, que conduciría a un  $\Psi_t = 0^\circ$ .

Respecto al vuelco, se aprecia que se produce con las menores  $d_t$  y los mayores  $\Psi_t$ . A partir de  $d_t \leq 1$  m y  $\Psi_t \geq 45$ , se produce el vuelco del vehículo. Estos dos límites se imponen en base a los resultados medidos del perfil 119 y de los videos del ensayo de impacto, donde se observa que el coche estuvo al límite de no producirse el vuelco. En cambio, el 2<sup>o</sup> ensayo del perfil 51 estuvo el límite de producirse el vuelco con  $d_t = 1,5$  m y  $\Psi_t = 40^\circ$ .

En referencia a los índices ASI, no se dispone de una tendencia para las distancias y ángulos transversales. Sí que se puede decir, que los ASIs más altos corresponden a las distancias transversales ( $d_t$ ) más grandes teniendo en cuenta la peculiaridad ya comentada del perfil CSB.

Los resultados obtenidos con el ensayo modificado del perfil 51 3<sup>er</sup>, muestra una  $d_t$  similar con los perfiles 73 y 119, y un  $\Psi_t$  parecido al perfil 73, dando a lugar el vuelco. En principio, era de esperar un comportamiento parecido a los otros ensayos con el perfil 51. La razón de esta diferencia se analiza en el apartado 4.5.6.

#### 4.5.4- Ejes de giro durante el impacto

En la Tabla 4.11 se presentan los resultados medidos para los ángulos y velocidades de giro consideradas para cada eje de rotación, mostrándose: para el giro  $\varphi_x$ , el ángulo y velocidad de rotación cuando el vehículo contacta con el suelo (4<sup>a</sup> fase); para el giro  $\varphi_y$ , el ángulo máximo de inclinación del vehículo (2<sup>a</sup> fase); para el giro  $\varphi_z$ , el ángulo máximo de desviación del coche después del 2<sup>o</sup> impacto (2<sup>a</sup> fase) y la velocidad angular durante el vuelo (3<sup>a</sup> fase).

Perfil de ensayo	ASI	Eje X		Eje Y	Eje Z		Vuelco
		$\varphi_x$ (°)	$w_x$ (°/s)	$\varphi_y$ (°)	$\varphi_z$ (°)	$w_z$ (°/s)	
R1	1,88	-25	-53	6,1	22	35	No
R2	1,72	22	28	10,4	20	43	No
51 1 <sup>er</sup>	1,62	45	44	13,4	20	20	No
51 nulo	-	-	-	-	-	-	No
51 2°	1,52	47	50	14,6	16	13	No
73	1,64	80	101	12,7	18	3	Sí
119	1,62	51	53	12,5	20	0	Sí
51 3 <sup>er</sup>	1,43	90	128	12,8	18	14	Sí

Tabla 4.11. Ángulos y velocidades de giro alrededor de los ejes X, Y y Z.

Analizando los resultados de giro alrededor del eje X, se observa un cierto aumento de los valores del ángulo ( $\varphi_x$ ) y de la velocidad ( $w_x$ ) a medida que ha avanzado la campaña experimental, apreciándose ángulos desde los  $-25^\circ$  (perfil R1) hasta los  $90^\circ$  (perfil 51 3<sup>er</sup>) y velocidades de giro desde los  $-53$  °/s (perfil R1) hasta los  $128$  °/s (perfil 51 3<sup>er</sup>). Estos resultados destacan dos apreciaciones importantes.

La 1<sup>a</sup> de ellas, es que entre los resultados de los perfiles R1 y R2 se puede interpretar que existe una forma de perfil intermedia que conduciría a un ángulo ( $\varphi_x$ ) y una velocidad de giro ( $w_x$ ) nulos. La 2<sup>a</sup> apreciación es la relación entre los resultados  $\varphi_x$  y  $w_x$  con el vuelco, donde se visualiza que el límite para producirse el vuelco se encuentra entre los perfiles 51 2° (no vuelca) y 119 (vuelca). Entre estos dos perfiles, se puede determinar que un ángulo  $\varphi_x \approx 50^\circ$  y una velocidad angular  $w_x \approx 50$  °/s, son los valores límite que determinan el vuelco. Así que, por la forma del perfil, el perfil 51 es el límite inferior para evitar el vuelco, pero con la excepción del perfil de ensayo 51 3<sup>er</sup>, donde las condiciones de ensayo son modificadas.

En los ángulos de giro  $\varphi_y$  se observan valores muy parejos entre los  $12,5^\circ$  y los  $14,6^\circ$ , excepto los perfiles R1 ( $6^\circ$ ) y R2 ( $10,4^\circ$ ) con ángulos ligeramente inferiores a los primeros debido a la forma más vertical del perfil que impide el remonte del vehículo. Centrándose en los resultados de giro del eje Z, los ángulos  $\varphi_z$  medidos no se diferencian en exceso según el tipo de perfil empleado, encontrándose en un rango entre  $16^\circ$  y  $22^\circ$ . Estos resultados muestran que el vehículo se redirecciona en el sentido longitudinal de la barrera durante el impacto. En referencia a las velocidades angulares  $w_z$ , se visualiza un evidente decrecimiento a medida que se ha avanzado en la campaña de ensayos. Este hecho se explica que los perfiles con formas más anchas y con mayor facilidad de deslizamiento implican un menor rebote del coche, y, por consiguiente, un menor grado de desviación.

Para poder entender mejor el comportamiento de giro de cada ensayo, en la Figura 4.16 se muestran los desarrollos de giro en los 3 ejes (giros  $\varphi_x$  (a),  $\varphi_y$  (b) y  $\varphi_z$  (c)) para los 7 ensayos. De esta manera se puede tener una visión más general de la evolución de los perfiles ensayados.

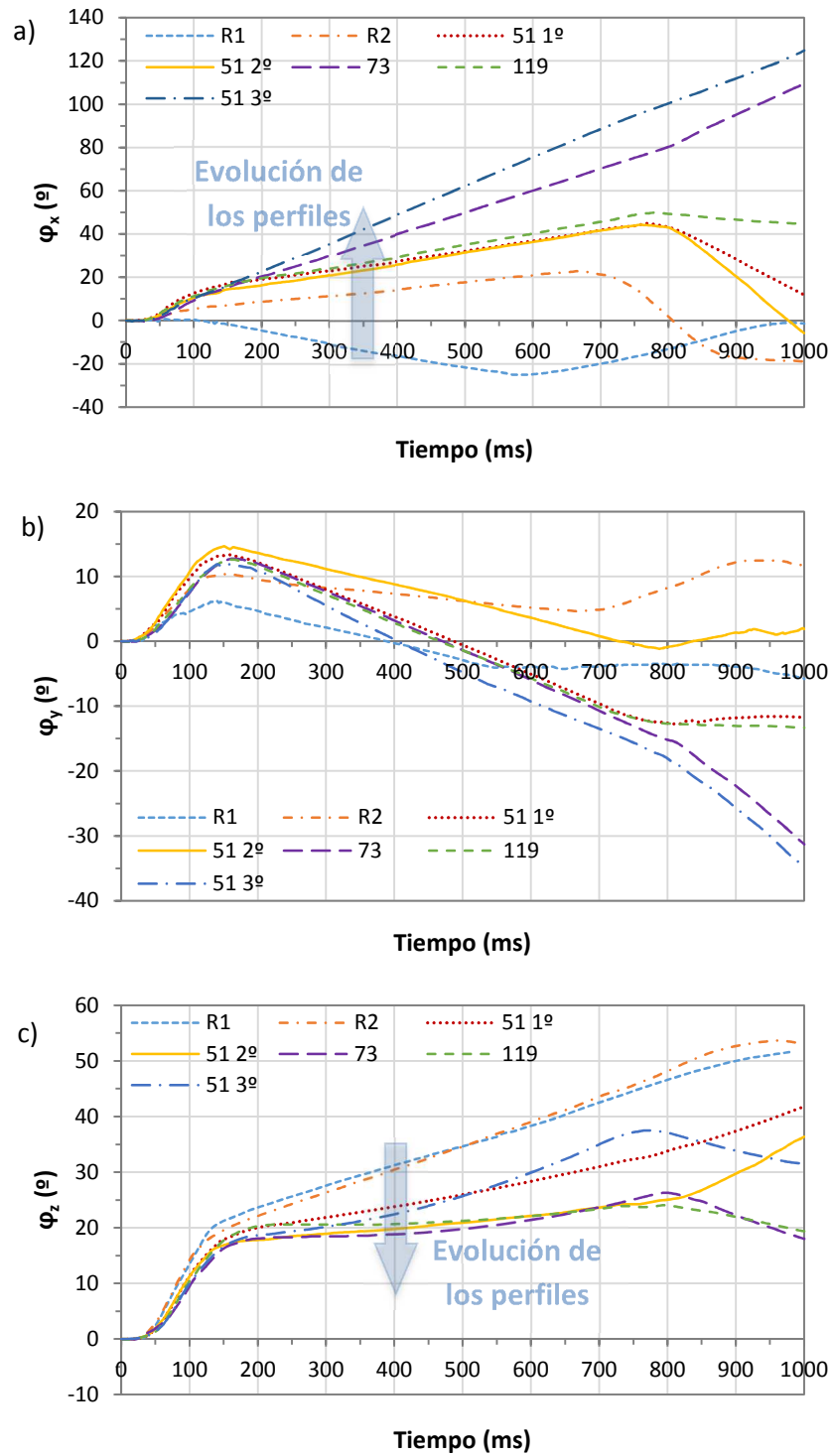


Figura 4.16. Giros  $\varphi_x$  (a),  $\varphi_y$  (b) y  $\varphi_z$  (c) de los ensayos de impacto.



En primer lugar, en la Figura 4.16.a se observa un aumento de giro  $\varphi_x$  a medida que se ha avanzado en la campaña experimental. Este hecho radica en el desarrollo de perfiles más anchos y con mayor facilidad al deslizamiento del vehículo registrando mayores ángulos  $\varphi_x$ . En el caso del perfil 119, se visualiza que la rotación se estabiliza alrededor de los 800 ms, pero posteriormente en los videos de ensayo aumenta de nuevo el giro entre los 1000 ms y los 1500 ms dando a lugar el vuelco.

En segundo lugar, en la Figura 4.16.b no se aprecia ninguna tendencia a medida que ha evolucionado el estudio experimental. en la forma del perfil. Evaluando los giros  $\varphi_z$  de la Figura 4.16.c, se ve una cierta disminución de rotación, dando a lugar un menor desvío del vehículo a medida que se ha desarrollado nuevos perfiles. Entre ellos destacan los ensayos de los perfiles R1 y R2, donde registran los mayores ángulos, debido a que se tratan de los perfiles con una forma más vertical e implican un mayor rebote cuando el coche impacta contra la barrera.

#### 4.5.5- Marcas de rozamiento

En la Tabla 4.12 se presenta las longitudes de contacto y los ángulos de rozamiento obtenidos en los 8 ensayos de impacto, incluyéndose el valor del ASI.

Perfil de ensayo	ASI	$L_t$ (m)	$L_p$ (m)	$L_{dp}$ (m)	$L_s$ (m)	$L_d$ (m)	$\gamma_p$ (°)	$\gamma_{dp}$ (°)
R1	1,88	3,0	2,0	1,0	2,8	0,2	5° - 7°	3°
R2	1,72	3,0	1,9	1,1	2,7	0,3	9°	7°
51 1 <sup>er</sup>	1,62	3,5	1,1	2,4	3,1	0,4	12°	9°
51 nulo	-	3,3	1,3	2,0	2,9	0,4	12°	9° - 10°
51 2°	1,52	3,5	1,4	2,1	3,0	0,5	10°	7° - 8°
73	1,64	4,1	1,1	3,0	3,5	0,6	14°	10° - 12°
119	1,62	3,7	0,9	2,8	3,1	0,6	11° - 13°	9°
51 3 <sup>er</sup>	1,43	3,7	1,3	2,4	3,2	0,5	12° - 13°	10° - 11°

Tabla 4.12. Resultados de las marcas de rozamiento.

En la Tabla 4.12 se observa, en primer lugar, que los valores de longitud total ( $L_t$ ) varían entre los 3,0 m (perfiles R1 y R2) y los 4,1 m (perfil 73). En ella, se detecta una cierta tendencia aumentar dicha longitud a medida que ha evolucionado la forma del perfil. Este hecho radica que para formas de perfil más anchas y menos inclinadas adaptadas a la forma del morro del vehículo, dan lugar a una mayor longitud total de rozamiento.

Analizando las longitudes de remonte del plinto ( $L_p$ ), se percibe una cierta disminución de su longitud a medida que se ha ido avanzando en el desarrollo de cada perfil propuesto. Se ve desde los 2 m del perfil Inglés hasta los 0,9 m del perfil 119. Esta secuencia responde a la

mayor facilidad de remonte de la rueda del vehículo durante el impacto de cada nuevo perfil respecto al anterior. De manera inversa ocurre con las longitudes de remonte después del plinto ( $L_{dp}$ ), cuanto más facilidad de remonte ofrezca el perfil mayor sea esta longitud.

Referente a las longitudes de desfase entre rueda y morro del vehículo ( $L_d$ ), destaca la tendencia a incrementarse dicha longitud a medida que ha evolucionado el perfil. Este hecho radica debido a la mayor longitud horizontal del plinto con cada nuevo perfil. Des de los 0,2 m del perfil R1 hasta los 0,6 m de los perfiles 73 y 119. En cuanto a las longitudes de la parte superior de la barrera ( $L_s$ ) se percibe una predisposición a aumentar dicha distancia cuanto mayor facilidad de subida ofrezca el perfil.

En relación a los valores ASI con las longitudes de rozamiento, no se aprecia ninguna tendencia clara con todos los ensayos. Pero sí que se puede afirmar que los mayores ASI (perfiles R1 y R2) se dan con las menores longitudes totales y de desfase morro – rueda, y, a la vez, con las mayores longitudes de remonte del plinto. Este hecho se explica por la forma vertical de estos dos perfiles que impiden el deslizamiento del vehículo sobre la barrera, además de una altura de plinto más alta que los otros perfiles.

Aunque las longitudes totales de los 7 ensayos de impacto de esta serie no arrojan ninguna tendencia del valor ASI, en la literatura técnica sí que se encuentra una relación unívoca de estas dos variables. En la Figura 4.17 se presentan 32 ensayos de impacto de un estudio recopilado por Shojaati y Schüler (1999) del Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zúrich (*Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, ETH*) y los 7 ensayos de impacto de esta campaña experimental. En ella se relaciona la longitud total de contacto del vehículo sobre la barrera y su correspondiente valor ASI. En estos 32 ensayos de impacto de la ETH no se diferencia el tipo de barrera empleada.

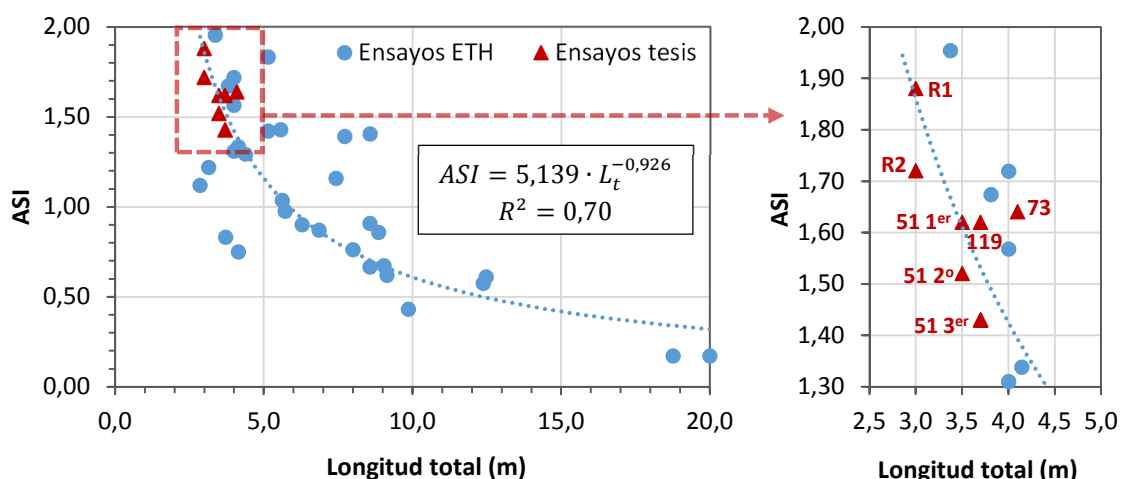


Figura 4.17. Relación entre el ASI y la longitud total de contacto con la barrera.

Tal y como se observa en la Figura 4.17 existe una tendencia a decrecer el valor ASI a medida que se aumenta la longitud total de contacto. Los resultados de los 7 ensayos de esta

tesis siguen el mismo patrón que los resultados de impacto de la ETH. Cabe destacar que hay que tener en cuenta de la cierta dispersión de los resultados para la línea de tendencia trazada.

Observando los dos ángulos de remonte del plinto y después del plinto de la Tabla 4.12, se aprecia una tendencia a aumentar dichos ángulos a medida que se ha ido desarrollando un nuevo perfil. Cuanta mayor sea la facilidad de subida del vehículo sobre la barrera, más rápidamente se eleva el coche y consecuentemente, mayor ángulo de inclinación. En el caso del perfil 119, esta tendencia se diluye ligeramente debido a la obtención de valores ligeramente inferiores a los esperados. Pero estos resultados van estrechamente ligados con los observados en los videos de los ensayos, donde se ve como el perfil 73, el vehículo tiende a elevar y rotar sobre sí mismo mucho más rápidamente que el perfil 119, por lo que se traduce unos ángulos de rozamiento mayores.

Respecto a los valores ASI con los ángulos de rozamiento, no se aprecia ninguna tendencia clara con todos los ensayos. Pero sí que se puede afirmar que los mayores ASI, perfiles Inglés y en menor medida el Inicial, se dan los menores ángulos registrados.

En referencia al ensayo modificado del perfil 51 3<sup>er</sup>, sus longitudes se asimilan mucho al 2<sup>o</sup> ensayo del perfil 51 con resultados casi idénticos. En cambio, sus ángulos de rozamiento registran valores altos que se equiparan con los medidos en los perfiles 73 y 119, perfiles donde el vehículo se ha levantado más y se ha producido el vuelco.

#### 4.5.6- Causa del vuelco del perfil de ensayo 51 3<sup>er</sup>

Como ya se ha visto en los resultados de todos los ensayos, el ensayo 51 3<sup>er</sup> es el que ha obtenido unos mejores índices de severidad de impacto, consiguiendo la calificación de barrera de clase B de acuerdo con la norma EN 1317 (2010). Pero esta consideración de clase B no es posible debido al vuelco que se ha producido durante el ensayo de impacto. Este suceso no era el esperado ya que en teoría se estimaba que tendría un comportamiento parecido a los otros realizados con el perfil 51 con las condiciones de ensayo estándar.

De acuerdo al análisis de los parámetros considerados, en el instante posterior al 2<sup>o</sup> impacto de la parte trasera del vehículo se produce un mayor impulso que el apreciado en los otros ensayos con el perfil 51. Este hecho implica a una mayor rotación en el eje X del vehículo y culmina con el vuelco del coche. Para dar respuesta a este hecho se presenta como principal hipótesis la distribución de las masas adicionales en el vehículo para llegar a los 940 Kg.

En la Tabla 4.13 se presenta la distribución de pesos en cada rueda de todos los ensayos de impacto. En ella, además se muestran las diferencias de pesos entre las ruedas delanteras, las diferencias de pesos entre las ruedas traseras; y de las diferencias de pesos entre las ruedas del lado derecho con los del izquierdo. Cabe decir que la suma total de los pesos de cada ensayo se debe añadir al peso del maniquí o *dummy* ( $78 \pm 4$  Kg). Para el ensayo R2 no se disponen de los datos de distribución de pesos.

Parámetro	R1	R2	51 1 <sup>er</sup>	51 2 <sup>o</sup>	73	119	51 3 <sup>er</sup>
Rueda frontal izquierda (Kg)	240	-	246,5	247	258	260	253
Rueda frontal derecha (Kg)	263	-	254	259	247	239	277
Rueda trasera izquierda (Kg)	161	-	144,5	142	144	141	153
Rueda trasera derecha (Kg)	156	-	165	166	171	172	178
Peso total ruedas (Kg)	820	-	810	814	820	812	861
Diferencia de pesos ruedas delanteras (derecha – izquierda) (Kg)	23	-	7,5	12	-11	-21	24
Diferencia de pesos ruedas traseras (derecha – izquierda) (Kg)	-5	-	20,5	24	27	31	25
Diferencia de pesos parte derecha con izquierda (Kg)	18	-	28	36	16	10	49
Vuelco	No	No	No	No	Sí	Sí	Sí

*Tabla 4.13. Distribución de pesos en cada rueda.*

Se observa que la distribución de pesos varía en cada uno de los ensayos de impacto, por lo que implica que en cada ensayo la posición del centro de gravedad del vehículo sea diferente. De los parámetros considerados, la diferencia de pesos de la parte derecha respecto de la izquierda es la que determina la mayor o menor facilidad que el coche gire alrededor del eje X. Los resultados de este parámetro muestran diferencias entre 10 Kg (119) y 49 Kg (51 3<sup>er</sup>) a favor del lado derecho. Por tanto, se ve que el ensayo 51 3<sup>er</sup> es el que presenta una distribución de pesos más favorable al vuelco.

Si se compara con los otros dos ensayos realizados con el mismo perfil (51), esta diferencia se reduce a 13 Kg (51 1<sup>er</sup>) y a 21 Kg (51 2<sup>o</sup>). De este modo, esta mayor desigualdad de pesos en favor del lado derecho del ensayo 51 3<sup>er</sup> puede ser el responsable del vuelco.

Otra hipótesis de menor relevancia es la incidencia del ángulo y velocidad de impacto en el vuelco del vehículo. Es posible que la reducción de 0,5<sup>o</sup> en el ángulo de impacto y el aumento de 2 Km/h de la velocidad del ensayo 51 3<sup>er</sup> respecto al ensayo estándar implique el efecto del vuelco. Este hecho podría ser debido el modo de cómo impacta la rueda trasera izquierda contra la barrera impulsando la rueda a elevarse más.

## 4.6.- CONCLUSIONES

El presente capítulo finaliza con unas conclusiones que recogen las principales ideas descritas en el texto. A partir de estas consideraciones, deberán servir como punto de partida para diseñar un nuevo perfil de barrera para el capítulo 5 siguiente.

- A medida que se ha avanzado en la optimización de la forma geométrica del perfil se ha reducido notablemente el ASI máximo, desde valores de 1,9 (R1) y de 1,7 (R2) de los perfiles de referencia hasta al valor de 1,5 (51 2º) del perfil 51.
- La evolución de los resultados de ASI del modelo de simulación respecto a los ASI de los ensayos reales, se ha observado una tendencia a converger los dos resultados. Se concluye que el ASI del modelo de simulación tiene un intervalo de confianza de  $\pm 0,1$ , por lo que se puede considerar que el modelo reproduce bastante bien el ASI real.
- Del mismo modo que el índice ASI, el índice THIV también se ha reducido a medida que se ha avanzado la campaña experimental, desde el valor de 30 Km/h del perfil R1 hasta los 26 Km/h del perfil ensayado 51 2º.
- Modificando las condiciones de ensayo respetando las tolerancias que exige la norma EN 1317 (2010), se mejoran de manera apreciable los índices de severidad. Para el ensayo 51 3º se ha obtenido un ASI = 1,4 y un THIV = 25 Km/h, valores propios de una barrera de clase B.
- Pero la barrera del ensayo 51 3º no se puede considerar de clase B debido al vuelco que se produce durante el ensayo. Es muy probable que la distribución desigual de masa en favor del lado derecho haya incidido en el vuelco. Por tanto, es recomendable aumentar el peso del vehículo en el lado izquierdo.
- De los perfiles ensayados, se establece que el perfil 51 (51 2º) es la forma de perfil límite para que el vehículo no vuelque después del impacto. Formas de perfiles más anchas con mayor facilidad de remonte y de deslizamiento del coche sobre la barrera (perfiles 73 y 119) conducen al vuelco del coche.
- Para finalizar se concluye que no se ha conseguido obtener un perfil de barrera de clase B, modificando solamente la forma geométrica del perfil y las condiciones de ensayo en base a las tolerancias que permite la normativa vigente (EN 1317 (2010)). Por tanto, para el capítulo 5 se deberán proponer nuevos aspectos de diseño más allá de los estrictamente geométricos.

## CAPÍTULO 5

# Aspectos mecánicos para el diseño de la barrera

### 5.1.- INTRODUCCIÓN

Como ya se ha visto en el capítulo 4, con sólo el diseño de la forma del perfil de barrera se han conseguido mejorar notablemente los resultados de ASI, desde valores de entorno de 1,7 a 1,9 (perfiles de referencia R1 y R2 respectivamente) hasta valores de ASI de 1,5 (perfil 51). Pero a pesar de todo no se ha alcanzado el objetivo inicial de obtener un  $ASI \leq 1,4$ . Por tanto, resulta muy difícil obtener una barrera de clase B si solamente se modifica la geometría del perfil. Para poder reducir el ASI es necesario proponer medidas más allá de las puramente geométricas del perfil de barrera.

La idea reside en que una parte de la energía de impacto lo absorba la barrera. Hasta el momento, la mayor parte de la energía de impacto lo asume el coche, pues la barrera se comporta como un sólido rígido, indeformable. Para ello, es necesario dotar la barrera de una cierta flexibilidad frente al impacto mediante la realización de cambios mecánicos. De este modo, al flexibilizar la barrera es de esperar una reducción de la severidad de impacto del vehículo.

El **objetivo principal** es la obtención de un perfil de clase B dotando a la barrera de una cierta flexibilidad frente al impacto. Para conseguir este hito se plantean otros objetivos específicos:

- Proponer las medidas necesarias para flexibilizar la barrera.
- Contrastar los resultados ASI obtenidos en el modelo de simulación con los ensayos de impacto real.
- Identificar y analizar los parámetros considerados de impacto y post-impacto de todos los ensayos.
- Analizar la influencia de las tolerancias que permite la normativa vigente (EN 1317 (2010)) para realizar el ensayo de impacto.

Para alcanzar los objetivos planteados se ha seguido el siguiente **método** de trabajo:

- 1º. Exponer la razón de ser para la flexibilización de la barrera
- 2º. Presentar los ensayos realizados y la evolución de las medidas tomadas para la flexibilización de la barrera.
- 3º. Mostrar el procedimiento común seguido para cada ensayo de impacto real.
- 4º. Identificar los parámetros a analizar de cada ensayo de impacto.
- 5º. Análisis de cada variable de todo el conjunto de ensayos realizados.

## 5.2.- RAZÓN DE SER PARA FLEXIBILIZAR LA BARRERA

La principal razón para dotar la barrera de hormigón de una cierta flexibilidad ante el impacto del vehículo es la reducción de los índices de severidad de impacto. Es esperable que cuánto más flexible sea la barrera, menor sea el ASI y THIV obtenidos.

En la Figura 5.1 se muestra la relación entre ASI y deformación máxima dinámica ( $D_{m\acute{a}x}$ ) de un total de 296 ensayos de impacto tipo TB11 recopilados en la literatura técnica, sin diferenciar el tipo de barrera empleada (entre barreras de hormigón *in situ*, de hormigón prefabricado o metálicas). Se observa que a medida que aumenta la deflexión dinámica de la barrera, se registran valores de ASI menores. Esta relación entre estas dos variables queda reflejada con la línea de tendencia con función exponencial expuesta en la misma figura.

En base a esta función se pone de manifiesto que para obtener un  $ASI \leq 1$  es necesario un desplazamiento máximo de 50 cm, mientras que para obtener un  $ASI \leq 1,4$  el desplazamiento máximo puede ser prácticamente nulo (barrera rígida), menor a 10 mm. Si bien, en los resultados de los ensayos con deflexión nula se observa que gran parte de ellos registran valores superiores a 1,4. De los 31 ensayos con deformación máxima observada del orden de milímetros, sólo 7 ensayos de impacto registran un  $ASI \leq 1,4$ . Por tanto, sólo el 23 % de los ensayos con bajo desplazamiento consiguen ser una barrera de clase B.

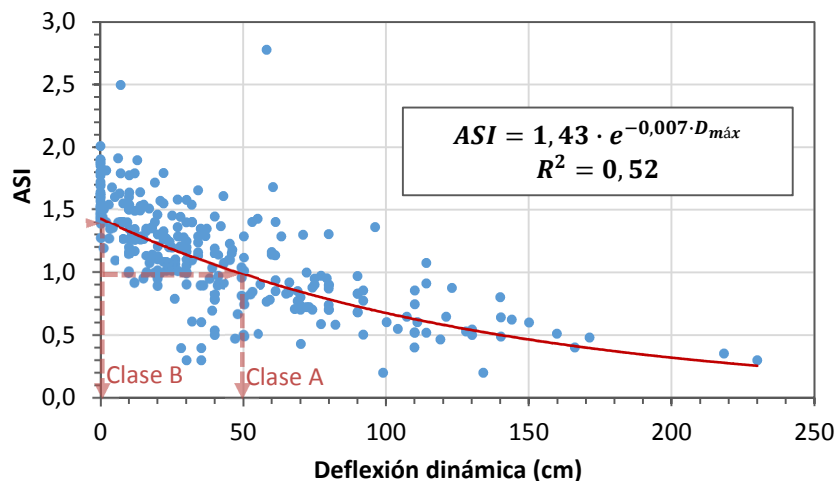


Figura 5.1. Gráfica relación ASI – Deflexión dinámica de 296 ensayos de impacto tipo TB11.

De los 296 ensayos recopilados, en 77 ensayos se ha podido conocer el tipo de barrera empleada y el procedimiento de ejecución (ver Figura 5.2). Del total de ensayos se tienen 19 con barrera de hormigón continua, 16 con barrera de hormigón prefabricada y 42 con barrera metálica. Además en la misma se muestran los intervalos de ASI y deflexión dinámica de cada uno de los 3 tipos de barrera.

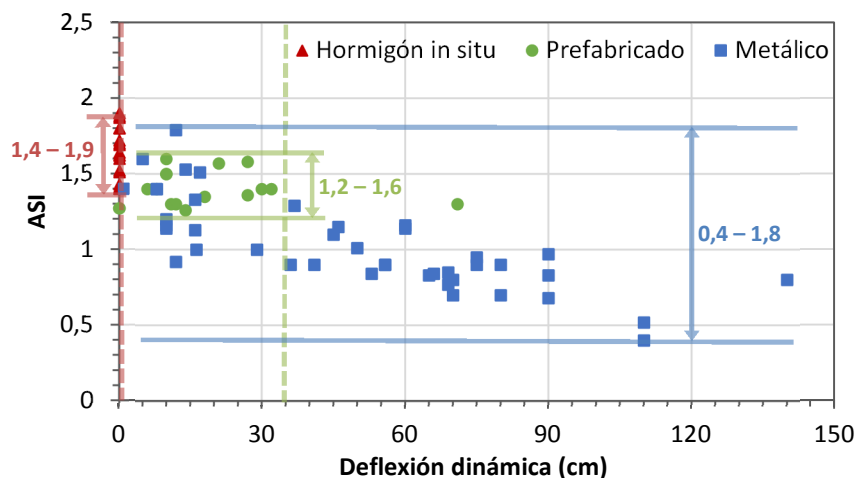


Figura 5.2. Relación ASI – Deflexión dinámica de 77 ensayos de impacto TB11 según tipo de barrera.

Se aprecia que los ensayos con barrera de hormigón *in situ* su deformación ante el impacto es nula, mientras que para los ensayos con barrera de hormigón prefabricada tienen desplazamientos entre 0 a 35 cm, con la excepción de un ensayo con un registro de 71 cm. En referencia a los ensayos con barrera metálica, estos presentan una gran variedad de deflexiones dinámicas desde de 0 hasta 140 cm.

Observando los valores ASI según el tipo de barrera, se tiene que para barreras de hormigón *in situ* el intervalo ASI se encuentra entre 1,4 y 1,9; para barreras de hormigón prefabricado el rango de ASI es de 1,2 a 1,6; y para barreras metálicas los valores ASI se sitúan



entre 0,4 y 1,8. Fijándose en el límite inferior de las barreras de hormigón *in situ*, el valor de ASI es de 1,4. Sólo 2 ensayos de 19 ensayos con barrera de hormigón *in situ* consiguen la distinción de barrera de clase B. Por tanto, alcanzar un  $ASI \leq 1,4$  con barrera de hormigón *in situ* es técnicamente difícil si sólo se actúa sobre la geometría del perfil transversal.

En definitiva, se deduce que para poder reducir el ASI de las barreras de hormigón *in situ*, debe aproximarse su comportamiento al que muestran las barreras de hormigón prefabricado. Éstas presentan deflexiones dinámicas que pueden permitir obtener  $ASI \leq 1,4$ .

En esta misma línea argumental de dar un cierto desplazamiento a la barrera ante el impacto del vehículo, en la Figura 5.3 se presenta el desplazamiento tipo de cada una de las 3 clases de barreras presentadas: barreras de hormigón *in situ*, barreras de hormigón prefabricadas y barreras metálicas. En base a los datos de desplazamiento máximo de los ensayos de la Figura 5.2, se representa en la Figura 5.3 el movimiento tipo de cada clase de barrera en el tiempo. Además, en ella se muestran los intervalos de los instantes de tiempo donde se produce el ASI máximo para cada tipo de barrera. De este modo se puede observar cuál es el desplazamiento efectivo para reducir la severidad de impacto.

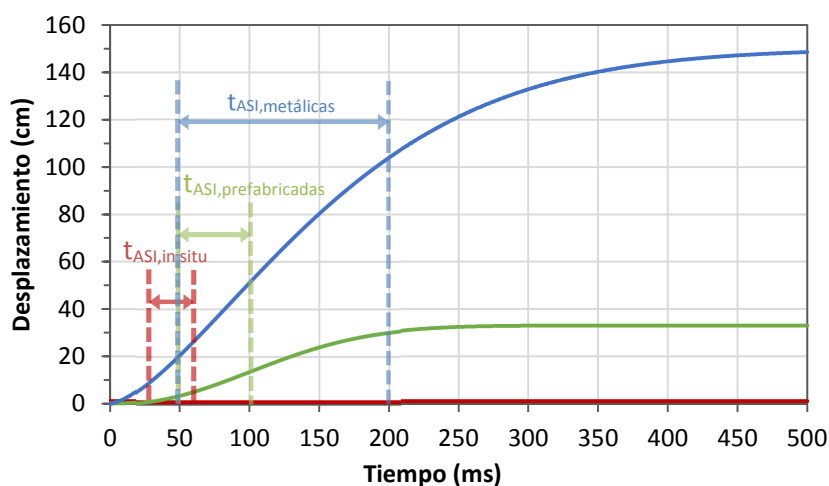


Figura 5.3. Desplazamiento en el tiempo según el tipo de barrera.

Se observa que para las barreras metálicas, los desplazamientos en el tiempo aumentan más rápido que las barreras prefabricadas. Teniendo en cuenta la referencia de que el ASI máximo se produce alrededor de los 50 ms en los ensayos de impacto con barreras de hormigón *in situ* de esta tesis, se ve claramente de la ventaja de las barreras metálicas para obtener valores ASI más bajos (Clase A), ya que desde el inicio los desplazamientos son mayores. Pero no siempre es posible disponer anchos de trabajo tan grandes y son necesarias barreras con mayor nivel de contención. Las barreras prefabricadas presentan mayores rigideces y menores anchuras de trabajo que las barreras metálicas que las hacen atractivas para su uso, además de obtener ASIs más que aceptables (clase B). Por esta razón, la barrera de hormigón *in situ* se tiene que asimilar al comportamiento flexible de las barreras prefabricadas pero sin olvidar de la rigidez y del nivel de contención que las caracteriza.

### 5.3.- CAMBIOS POTENCIALES A APLICAR SOBRE LA BARRERA

Para conseguir que una barrera de hormigón *in situ* continua se asimile a una barrera de hormigón prefabricado es necesario aplicar una serie de modificaciones sobre el perfil base. En la Tabla 5.1 se presentan 5 acciones posibles para aplicar sobre la barrera y la razón de su empleo. El uso de una de ellas no impide el empleo de las otras opciones, por tanto, pueden utilizarse de manera simultánea dos o más acciones para conducir a una mayor flexibilidad. Hay la excepción de las acciones de corte y pre-corte que sólo se puede aplicar una de ellas.

Acción	Modo de realización	Razón de su empleo
Cortes	Cortar la sección de hormigón cada 4 m. Se coloca una parrilla de barras de acero para rigidizar la unión	Hacer que la barrera de hormigón sea discontinua pero con una cierta unión entre los bloques de hormigón cortados
Pre-cortes	Pre-cortes sobre la sección de hormigón cada 3 m a una profundidad de 4 cm	Inducir que aparezcan fisuras de retracción en las zonas de los pre-cortes
Fibras plásticas	Modificando la dosificación del hormigón	Sustitución de las barras de acero. Mayor deformación residual en caso de rotura de la barrera
Capa base de plástico	Extender en la base una capa de plástico	Disminuir el rozamiento de la barrera con el suelo
Perfil de porexpan	Extender en la base un perfil longitudinal de porexpan	Disminuir el rozamiento de la barrera con el suelo. Reducir la sección de hormigón

Tabla 5.1. Acciones para flexibilizar la barrera.

La aplicación de estas acciones también vendrán condicionadas por el coste total que puede tener la nueva barrera. En base al precio de un perfil simple de hormigón *in situ* entre 50-60 €/ml, la adición de fibras plásticas tiene un coste de 3,72 €/ml (con 2 Kg/m<sup>3</sup>) en sustitución de los 2φ12 que tienen un precio de 1,2 €/ml. Por tanto, la sustitución de fibras por las barras de acero tienen un incremento de precio medio de un 5% (fuente de precios GIVASA).

### 5.4.- ENSAYOS REALIZADOS

En este apartado se presentan los 4 ensayos de impacto con medidas de flexibilización de la barrera continua. En la Tabla 5.2 se muestran los 4 ensayos, ordenados por orden cronológico. En la misma se presenta la nomenclatura del perfil, el perfil base donde se ha trabajado para la flexibilización de la barrera y las modificaciones mecánicas empleadas de cada perfil. En ella, se aprecia que los perfiles base utilizados son el 119 (1 ensayo) y el 51 (3 ensayos). Para el perfil 120 se tomó el perfil 119 para comparar los resultados obtenidos entre las 2 barreras con y sin modificaciones mecánicas. Para los perfiles 121, 122 y 123 se escogió el perfil

51 por ser el perfil que había obtenido mejores resultados ASI. En la Figura 5.4 se exponen las medidas geométricas de las formas de perfiles utilizados: el perfil 51 y el perfil 119.

Perfil	Perfil base	Fecha	Acciones				
			Cortes	Pre-cortes	Fibras plásticas	Capa de plástico	Perfil de porexpan
120	119	12/09/2013	Sí	No	No	No	No
121	51	11/11/2013	Sí	No	No	Sí	No
122	51	22/04/2014	No	Sí	Sí	Sí	Sí
123	51	31/10/2014	No	Sí	No	No	Sí

Tabla 5.2. Ensayos de impacto realizados con barreras flexibles ante el impacto.

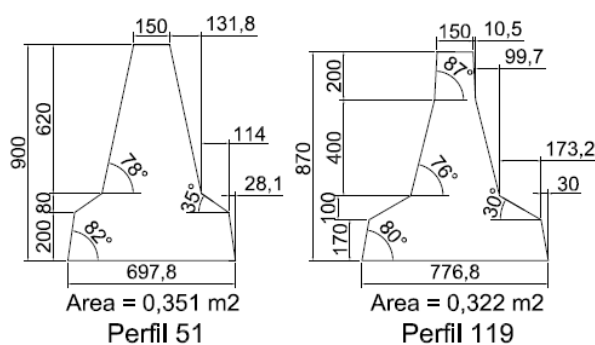


Figura 5.4. Perfiles 51 y 119. Cotas en mm.

## 5.5.- METODOLOGÍA COMÚN DE CADA ENSAYO

Como en el capítulo 4, se ha seguido una metodología común en cada uno de los ensayos de impacto. A continuación se van a presentar las modificaciones en las dosificaciones y la estrategia de pre-cortes, cortes, perfil de porexpan y capa de plástico que se va a seguir.

### 5.5.1- Dosificaciones empleadas

Las 2 dosificaciones utilizadas en estos 4 ensayos de impacto se muestran en la Tabla 5.3. Entre ellas se diferencian según si se ha empleado fibras plásticas de prolipropileno como sustitución de las barras de acero. Se observa que el uso de fibras plásticas lleva asociado un aumento del de plastificante hasta 1,5 l/m<sup>3</sup> para hacer más trabajable el hormigón debido a la adición de fibras. La cantidad variable entre 2 y 3 Kg/m<sup>3</sup> se debe a que durante la construcción de la barrera con el perfil 122, en el primer tramo de la barrera (primeros 15 m de la barrera) se utilizaron 3 Kg/m<sup>3</sup>; pero se observó un exceso de fibras con una cierta dificultad para una correcta extrusión del hormigón por el molde y la presencia de erizos de fibras dentro de la masa de hormigón. Por esta razón, se disminuyó la proporción de fibras a 2 Kg/m<sup>3</sup>, apreciándose una mejor textura y extrusión del hormigón y la disminución de la presencia de erizos.

Material	D2	D3
Arena	950	950
Grava 8/12	150	150
Grava 10/20	800	800
Cemento CEM II A-V 42,5 R	350	350
Plastificante	1 L/m <sup>3</sup>	1,5 L/m <sup>3</sup>
Aireante	1 L/m <sup>3</sup>	1 L/m <sup>3</sup>
Agua	≈175	≈175
Fibras de polipropileno	-	2 - 3

Tabla 5.3. Dosificaciones utilizadas (en Kg/m<sup>3</sup>).

### 5.5.2- Estructura de la barrera según el perfil

Respecto a la metodología de construcción, las 4 barreras difieren según el tipo de perfil empleado y las medidas empleadas para la flexibilización de la barrera. En la Tabla 5.4 se muestra un esquema estructural de cada perfil construido.

En el caso del perfil 120 se aprecia el empleo de 2 $\phi$ 12 situados en la parte superior del perfil y de la colocación en la zona de corte de parrillas con medidas de 85 x 75 cm con 8 barras de acero  $\phi$ 12 colocada 4 horizontales y 4 verticales.

Para el perfil 121 también se coloca una parrilla en la zona de corte pero se modifican las medidas y la cuantía de barras. Se añade una barra horizontal y otra en diagonal, dando lugar unas medidas de la parrilla de 75 x 75 cm. Esta modificación se ha hecho con el fin de rigidizar la unión en la zona de corte y reforzar la estructura para que ésta aguante los esfuerzos derivados del proceso de extrusión del hormigón durante la construcción de la barrera. Adicionalmente, en la base de la barrera por debajo de la parrilla se coloca un paso de agua (elemento habitual en carreteras para desaguar). Además, con el fin de aumentar la flexibilidad de la barrera se coloca una capa de plástica (200  $\mu$ m de grosor) en toda la base de la barrera.

El perfil 121 tiene la singularidad de prescindir las barras longitudinales de acero por la adición de fibras plásticas. En este perfil se visualiza de la extensión de un perfil de porexpan en la base de la barrera. Su forma y medidas permiten el deslizamiento del hormigón entre el perfil de porexpan y el molde de extrusión durante su ejecución. En este caso, a diferencia de los perfiles 120 y 121, se realizan pre-cortes cada 3 m con una profundidad de 4 cm.

Finalmente, en el perfil 123 se colocan 3 barras  $\phi$ 12 longitudinalmente con el objetivo de rigidizar la barrera y contener el impacto de vehículos pesados. En la base se introduce un perfil de porexpan pero a diferencia del perfil 122, sus medidas son de 2 cm de grosor y un ancho

de 40 cm. Estas medidas persiguen la disminución del rozamiento de la barrera con el suelo y facilitar el deslizamiento del sistema durante el impacto.

Perfil	Estructura de la barrera
120	
121	
122	
123	

Tabla 5.4. Estructura de los 4 perfiles diseñados. (Cotas en mm)

## 5.6.- VARIABLES A ANALIZAR DE CADA ENSAYO

En este apartado se presentan las variables estudiadas de cada uno de los 4 ensayos de impacto realizados y su razón de ser. A partir de estas variables consideradas y su posterior análisis de resultados deberá permitir:

- Detectar los comportamientos diferenciales entre ensayos.

- Comparar los resultados de los 4 ensayos con barrera flexible respecto a los ensayos con barrera rígida presentados en el capítulo 4.
- Analizar los resultados ASI con las modificaciones mecánicas para flexibilizar la barrera.
- Parametrizar con una función 4-paramétrica el desplazamiento de la barrera ante el impacto del vehículo.
- Establecer las medidas para evitar el vuelco.

En base a estos objetivos, en la Tabla 5.5 se presentan las variables a analizar de cada ensayo. En esta, se observa que las variables se dividen en tres tipos según el instante de medición: antes, durante y posterior al ensayo. Dentro de cada etapa se estudian los parámetros que pertenecen al vehículo o a la barrera. También se describen cada una de las variables y sus parámetros de medición, donde cada parámetro medido se le asigna una nomenclatura.

Etapas	Elemento	Variables estudiadas		Parámetro medido	Nomenclatura
Antes del ensayo	Vehículo	Condiciones de ensayo		Velocidad	$v$
				Ángulo de impacto	$\beta_i$
				Masa	$M$
				Centro de gravedad	$cdg$
				Posición del acelerómetro	$p_a$
		Punto de impacto	Distancia entre corte y punto de impacto	$L$	
	Barrera	Distancia de lanzamiento	Distancia de lanzamiento	$d_l$	
Durante el ensayo	Vehículo	Índices de severidad de impacto		ASI	ASI
				THIV	THIV
		Ejes de giro		Giro de los ejes x, y y z	$\theta_x, \theta_y, \theta_z$
	Barrera	Desplazamiento de la barrera		Desplazamiento máximo	$D_{m\acute{a}x}$
				Desplazamiento ASI	$D_{ASI}$
				Desplazamiento remanente	$D_r$
Desplazamiento elástico				$D_e$	
Después del ensayo	Vehículo	Contrastación con el ASI de simulación		ASI de simulación	$ASI_{sim}$
		Posición de contacto con el suelo		Distancia transversal	$d_t$
				Ángulo transversal	$\psi_t$
	Barrera	Marcas de rozamiento	Longitudes	Longitud total	$L_t$
				Longitud de remonte al plinto	$L_p$
				Longitud de remonte después del plinto	$L_{dp}$
			Longitud de desfase morro rueda	$L_d$	
			Longitud parte superior de la barrera	$L_s$	
			Ángulos	Ángulo remonte del plinto	$\gamma_p$
		Ángulo remonte después del plinto		$\gamma_{dp}$	
		Parametrización del desplazamiento		Función 4-paramétrica	$D$

Tabla 5.5. Variables a analizar para cada ensayo de impacto.

En esta fase de estudio, además de las variables estudiadas del capítulo 4, se añaden 3 nuevos parámetros a analizar: la influencia de la posición del punto de impacto del vehículo

contra la barrera, la medición del desplazamiento de la barrera cuando el coche impacta y una parametrización del desplazamiento de la barrera mediante con una función 4-paramétrica.

### 5.6.1- Condiciones de ensayo

Cada una de las variables que determinan las condiciones de ensayo ya han sido descritas y estudiadas en el capítulo 4. En la Tabla 5.6 se exponen las medidas de la velocidad y del ángulo de impacto, la masa total del vehículo, la posición del centro de gravedad y la posición del acelerómetro de cada perfil. La posición del cdg queda determinada en la Figura 4.5 del anterior capítulo.

Perfil	120	121	122	123
v (Km/h)	100	100	100	102
$\beta_i$ (º)	20	20	20	19,5
M (Kg)	900	900	900	938
cdg (m)	Sin variación	Sin variación	Sin variación	$\Delta x = -0,041$ $\Delta y = +0,021$ $\Delta z = -0,015$
$p_a$	1 cdg	1 cdg	1 cdg y 1 atrasado 7 cm	1 cdg y 1 atrasado 7 cm

Tabla 5.6. Condiciones de ensayo.

Se observa que las variables referentes a la velocidad, al ángulo de impacto y masa no varían en los perfiles 120, 121 y 122. Este hecho radica en unas condiciones más óptimas de ensayo para el perfil 123 para que la energía de impacto contra la barrera sea menor (combinación de  $V$  y  $\beta_i$ ). En referencia a la posición del acelerómetro, se coloca en el cdg del vehículo en los ensayos de los perfiles 120 y 121. Sin embargo, tal y como se ha podido ver en el capítulo 4, atrasar el acelerómetro 7 cm por detrás del cdg, se consigue reducir el valor ASI del orden de un 4 % (ensayo 51 3<sup>er</sup>). Por tanto, en los perfiles 122 y 123 se opta para medir el ASI en dos posiciones: en el cdg y a 7 cm detrás del cdg.

Respecto a la masa total del vehículo, todos los ensayos se mantiene se mantiene el mismo peso excepto el ensayo del perfil 123 donde se aumenta hasta los 938 Kg. Este incremento de peso se realiza mediante la colocación de lastres (discos y prismas de acero; y sacos de arena) en la parte izquierda del maletero con el objetivo de desplazar el cdg.

### 5.6.2- Punto de impacto

Con esta variable se pretende estudiar cuál es la distancia óptima del punto de impacto del vehículo contra la barrera respecto a la junta ejecutada in situ ( $L$ ), ver Figura 5.5.

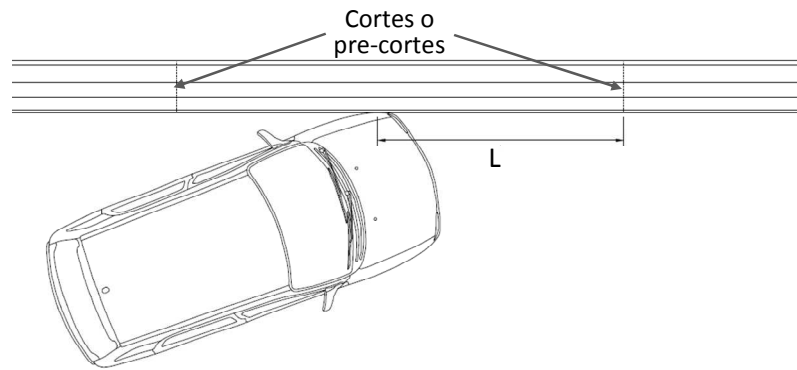


Figura 5.5. Medición de la distancia del punto de impacto.

La distancia  $L$  determinará el grado de giro de la junta y, por tanto, el desplazamiento por flexión de la barrera. En ese sentido, si se produce una mayor deflexión de la barrera se registrará un ASI menor. La determinación del valor óptimo de  $L$  a nivel de flexibilidad – ASI se lleva a cabo mediante simulación numérica.

### 5.6.3- Desplazamiento de la barrera y su parametrización

Adicionalmente a la medición de los índices de severidad de impacto, también se mide la evolución del desplazamiento de la barrera en el tiempo durante la secuencia de impacto. Se correlacionará el desplazamiento máximo medido con el valor ASI obtenido.

Posteriormente, se parametrizará la curva de desplazamiento – tiempo mediante una función 4-paramétrica. En la tesis doctoral de Alarcón (2005) se describe detalladamente el modo de uso de este tipo de funciones. En la ecuación 5.1 se muestra la función  $D(t)$  utilizada y la descripción de cada parámetro.

$$D(t) = \overbrace{D_{m\acute{a}x} \cdot \left[ 1 - e^{-k_D \left( \frac{|t-t_{min}|}{c_D} \right)^{p_D}} \right]}^{\text{Desplazamiento m\acute{a}ximo}} - \overbrace{D_e \cdot \left[ 1 - e^{-k_e \left( \frac{|t-t_{min}|}{c_e} \right)^{p_e}} \right]}^{\text{Recuperaci\acute{o}n el\acute{a}stica}} \quad [\text{Ec. 5.1}]$$

$D_{m\acute{a}x}$  = Desplazamiento m\acute{a}ximo

$t$  = tiempo

$t_{min}$  = tiempo inicial

$k_D$  = valor de desplazamiento en el punto de inflexi\o{n} de la funci\o{n}

$c_D$  = valor de tiempo en el punto de inflexi\o{n} de la funci\o{n}

$p_D$  = factor de forma  $p < 1$  c\o{ncava},  $p > 1$  convexa con forma de S

$D_e$  = Desplazamiento el\acute{a}stico

$k_e, c_e, p_e$  = respectivamente desplazamiento, tiempo en el punto de inflexi\o{n} y factor de forma de la funci\o{n} el\acute{a}stica

En ella se observa que la funci\o{n} desplazamiento  $D(t)$  se compone del sumando de dos funciones 4-param\etricas: la que determina el desplazamiento m\acute{a}ximo y la que pertenece a la



recuperación elástica. En la Figura 5.6 se muestra un ejemplo de la implementación de la función  $D$  para el ensayo de impacto sobre el perfil 121. En esta se observa que la función  $D$  se asimila al desplazamiento real con un error relativo medio del 6 %, y con un error máximo relativo del 34 % en los 70 ms, en base a los valores de los parámetros considerados de la función desplazamiento.

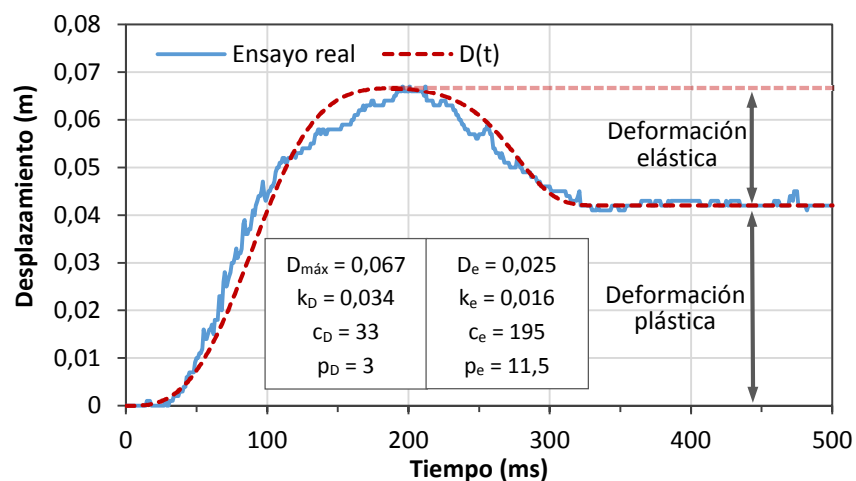


Figura 5.6. Desplazamiento en el tiempo con la función valor del perfil 121.

Uno de los objetivos que se plantea con la utilización de esta función  $D(t)$  es que las distintas variables que involucran a la función dependan de las características físicas de la barrera (coeficiente de rozamiento, masa, armado, cortes, pre-cortes, etc).

## 5.7.- SIMULACIONES REALIZADAS

### 5.7.1- Perfil 121

El perfil 121 se ha diseñado en base al modelo de simulación del perfil 51. En este se han simulado discontinuidades en la barrera, cada 4 metros, para reproducir los cortes. En cada zona de corte se incluye una parrilla de 75 x 75 cm de barras  $\phi 12$ . En la Figura 5.7 se muestra una captura del modelo en la zona de discontinuidad de la barrera y de la armadura dispuesta.

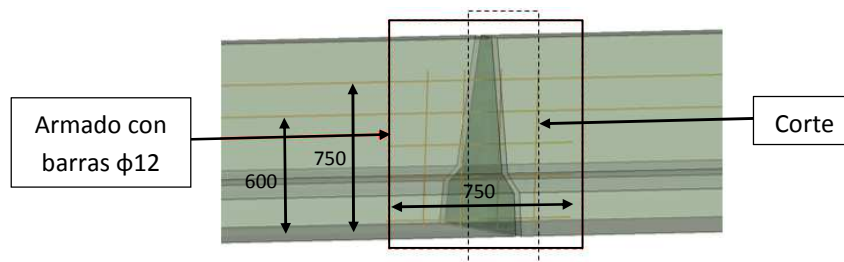


Figura 5.7. Detalle del armado en la zona del corte del modelo. (Fuente: IDIADA)

Por otra parte, el efecto de la lámina de plástico en el rozamiento barrera-terreno se ha simulado reduciendo el coeficiente estático y dinámico de rozamiento. Para poder evaluar el coeficiente de rozamiento estático que incide con una capa de plástico (con un grosor de 200  $\mu\text{m}$ ) sobre zahorra compacta se ha realizado un ensayo a pequeña escala. Dicho ensayo consiste en la colocación sobre de zahorra compacta de la capa de plástico y encima de él una masa de 100 Kg. Luego se procede a estirar la capa de plástico midiendo la fuerza ejercida de forma creciente hasta llegar a deslizar la capa de plástico sobre la zahorra. En el instante donde empieza a moverse, se registra el nivel de fuerza. En la Figura 5.8 se presenta el esquema de fuerzas que actúan en este ensayo. En las ecuaciones desde 5.2 hasta 5.5 se muestra el camino seguido para obtener el coeficiente de rozamiento  $\mu$  a partir de la 2ª Ley de Newton.

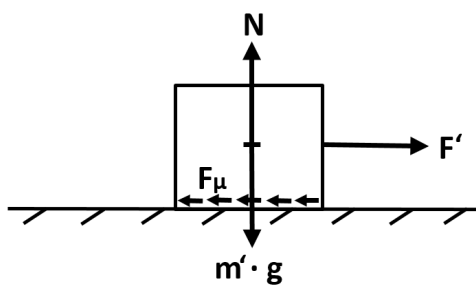


Figura 5.8. Esquema de fuerzas.

$$2^{\text{a}} \text{ Ley de Newton: } \quad \Sigma F = 0 \quad [5.2]$$

$$F' - F_{\mu} = 0, \quad \text{donde } F_{\mu} = \mu \cdot N = \mu \cdot m' \cdot g \quad [5.3]$$

$$F = F_{\mu} = \mu \cdot m' \cdot g \quad [5.4]$$

$$\mu = \frac{F}{m' \cdot g} \quad [5.5]$$

$F'$  = fuerza ejercida,  $F_{\mu}$  = fuerza de rozamiento,  
 $m'$  = masa,  $g$  = gravedad,  $N$  = fuerza normal,  
 $\mu$  = coeficiente de rozamiento estático

Este ensayo se realizó dos veces consecutivas para ver evaluar su repetitividad. El primer ensayo arrojó una fuerza  $F' = 500 \text{ kN}$ , y el segundo ensayo se registró una  $F' = 455 \text{ kN}$ . Con estos dos valores de fuerza se tienen unos coeficientes de rozamiento de 0,51 para el primer ensayo y de 0,46 para el segundo. Si se hace la media, se tiene una  $\mu = 0,49$ . Comparándolo con el coeficiente de rozamiento sin la capa de plástico ( $\mu = 0,65$ , rozamiento entre hormigón y zahorra compactada), se consigue una reducción de un 25%. Por tanto, el empleo de una capa de plástico favorecerá al desplazamiento de la barrera ante el impacto.

Para estudiar el comportamiento de la barrera frente a distintos valores de  $\mu$ , se han propuesto 3 valores de  $\mu$  con el perfil 121. Las 3 simulaciones tienen como punto de impacto en la zona de corte ( $L = 0 \text{ m}$ ). En la Tabla 5.7 se presentan los resultados obtenidos donde también se muestran los desplazamiento máximos medidos ( $D_{\text{máx}}$ ).

Simulación	121S1	121S2	121S3
$\mu$	0,65	0,30	0,10
ASI	1,50	1,46	1,46
$D_{\text{máx}}$ (mm)	105	310	350

Tabla 5.7. Resultados de las simulaciones en función del valor  $\mu$ .

Se visualiza que la reducción de  $\mu$  viene acompañado de una reducción del ASI y de un aumento  $D_{\text{máx}}$ . En el caso del valor ASI, dicha disminución se produce entre las simulaciones

121S1 y 121S2 con una reducción de un 3 %. En cambio, entre las simulaciones 121S2 y 121S3, el ASI es invariante. Respecto a los  $D_{m\acute{a}x}$ , el hecho de haber reducido el rozamiento del perfil se ha traducido en un aumento del orden de 3 veces al registrado con una  $\mu = 0,65$ . Por tanto, en base a los resultados de estas simulaciones y sabiendo que el coeficiente de rozamiento con la capa de plástico es de 0,49, se deduce que el ASI esperado estará en el entorno de 1,48.

Otro aspecto relevante a evaluar es el valor de  $L$  que minimiza el valor del ASI numérico. Para determinarlo se debe tener en cuenta el modo en cómo se produce la fuerza de impacto. La fuerza que ejerce el coche sobre la barrera es una fuerza distribuida sobre una área de contacto. Se puede suponer que la fuerza de impacto se distribuye linealmente actuando sobre barras unidas muelles a flexión (rótulas con rigidez al giro, siendo esa rigidez función del tipo y configuración del armado de la junta) como la mostrada en la Figura 5.9.

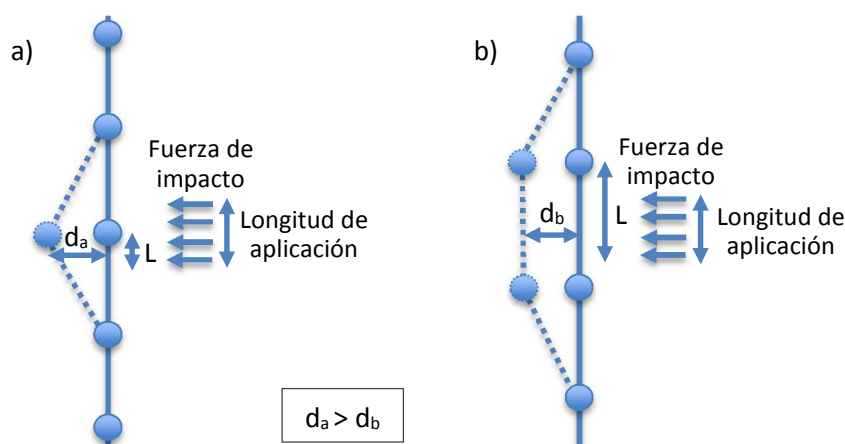


Figura 5.9. Esquema modo de aplicación de la fuerza de impacto.

Se observa que para el caso de la Figura 5.9.a la fuerza de impacto es aplicada sobre una rótula, mientras que para la Figura 5.9.b la fuerza se concentra en una barra. Este hecho conlleva que el desplazamiento del caso a) ( $d_a$ ) es mayor que el de b) ( $d_b$ ) porque la energía involucrada en proceso de impacto (la parte que absorbe la barrera) se disipa movilizand o menos rótulas que en el caso b) y, por tanto, el giro que se concentra en las rótulas del modelo a) es mayor (y por ende también el desplazamiento).

En base a los 2 ensayos de impacto realizados con el perfil 51 se ha medido que la longitud de contacto del vehículo a la barrera desde el contacto inicial hasta llegar al instante de ASI máximo está comprendida entre 1,5 m (perfil 51 1<sup>er</sup>) y 1,7 m (perfil 51 2<sup>o</sup>). De este modo, si se supone que fuerza de impacto se distribuye de manera constante, la  $L$  óptima para producir el mayor desplazamiento de la barrera es entre 0,75 m y 0,85 m.

En la Tabla 5.8 y en la Figura 5.10 se presentan los resultados de 9 simulaciones, cada una con una distancia de impacto  $L$  determinada. En las mismas, se exponen los resultados de ASI y el desplazamiento registrado hasta los 100 ms ( $D_{100}$ ). El coeficiente de rozamiento adoptado para las distintas simulaciones es  $\mu = 0,65$ .

Simulación	121S1	121S4	121S5	121S6	121S7	121S8	121S9	121S10	121S11
L (m)	0	0,5	0,9	1,0	1,1	1,7	2,3	3	3,5
ASI	1,50	1,58	1,40	1,40	1,48	1,49	1,59	1,65	1,63
D <sub>100</sub> (mm)	63	82	94	94	93	75	57	31	37

Tabla 5.8. Resultados de las simulaciones del perfil 121 en base a la distancia de impacto (L).

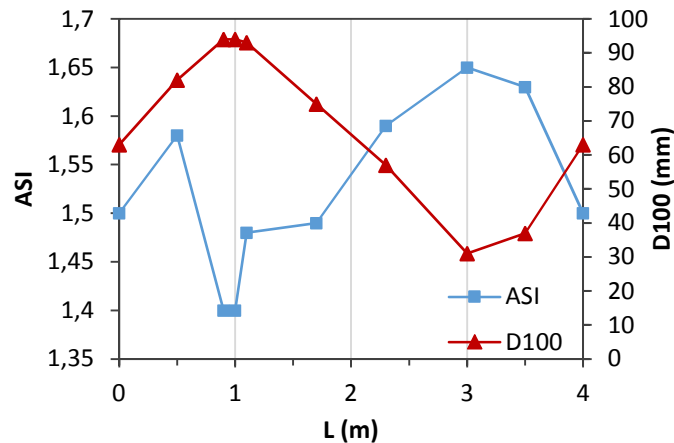


Figura 5.10. Resultados de las simulaciones del perfil 121 en base a la distancia de impacto (L).

Se observa que según la distancia L existe una correlación entre los valores de ASI y de D<sub>100</sub>. Se aprecia que cuando mayor es el valor D<sub>100</sub>, menor es el índice ASI. El valor mínimo de ASI se produce a una distancia L = 0,9 y 1 m, coincidiendo con los valores máximos de D<sub>100</sub> de la gráfica. En cambio, si el punto de impacto se sitúa a L = 3 m, el índice ASI aumenta en un 18 % respecto al valor mínimo (ASI = 1,40), coincidiendo con los valores mínimos de D<sub>100</sub>.

### 5.7.2- Perfil 122

La principal característica del perfil 122 es la ausencia de las barras de acero longitudinales y también de las parrillas existentes de los perfiles 120 y 121. En este perfil se incluye un núcleo de porexpan de dimensiones 46,0 x 20,8 cm<sup>2</sup> (ver Figura 5.11.a) con el fin de reducir el peso de la misma y el área de contacto hormigón - suelo.

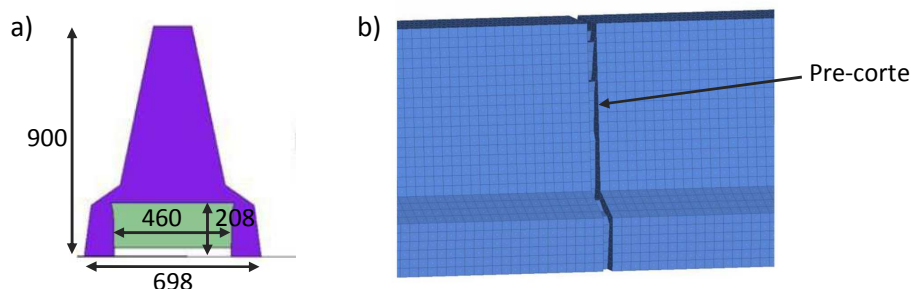


Figura 5.11. Perfil 122 en la simulación (a) y detalle del pre-corte (b). Cotas en mm. (Fuente: IDIADA)

De acuerdo con las medidas presentadas, la sección del perfil de porexpan es de 0,096 m<sup>2</sup>, suponiendo un 27 % de la superficie total del perfil 51 (área total = 0,351 m<sup>2</sup>, 0,255 m<sup>2</sup> de hormigón). A nivel numérico se ha simulado el porexpan como un material elástico con una densidad de 23 Kg/m<sup>3</sup> y un módulo de Young de 2,0 GPa. El peso por metro lineal del perfil 122 del modelo es de 588,7 Kg/ml (807,3 Kg/ml sin el núcleo de porexpan), representando una reducción del peso por metro lineal de un 27 %.

Otra factor que también se ve afectado por la colocación del porexpan es el coeficiente de rozamiento. De los 698 mm de base total, 238 mm son de hormigón y 460 mm de porexpan. En el modelo se ha implementado que el coeficiente de rozamiento entre el perfil y el suelo sea de 0,22 en vez de los 0,65 del perfil con toda la base de hormigón.

En la Figura 5.11.b se muestra un detalle del pre-corte de la barrera en el modelo. El pre-corte del perfil se ha simulado como una entalla de 4,0 cm y 3,0 cm de ancho.

La adición de 3 kg/m<sup>3</sup> de fibras plásticas en la dosificación de hormigón modifica el comportamiento de éste en fase post-rotura. Si bien, esta resistencia post-rotura no se moviliza en impactos de coches (la barrera no rompe) y, por tanto, la consideración esta resistencia no es necesaria, pues no afecta al comportamiento tenso-deformacional del material para los niveles de carga que se producen.

En la Tabla 5.9 se presentan los resultados de ASI y de D<sub>máx</sub> de 4 simulaciones. El perfil 122S1 se compara con los perfiles 51S1, 51S2 y 121S6 para analizar y comprender mejor los resultados obtenidos. Dicho perfil presenta pre-cortes cada 4 m y de 4 cm de profundidad.

Simulación	51S1	51S2	121S6	122S1
Barrera longitudinal	Continua	Continua	Discontinua (cortes cada 4 m)	Continua (pre-cortes cada 4 m)
L (m)	Sin restricción	Sin restricción	1,0	1,0
Perfil de porexpan	No	Sí	No	Sí
μ	0,65	0,22*	0,65	0,22*
ASI	1,54	1,51	1,40	1,40
D <sub>máx</sub> (mm)	0	17	94**	94

\* Es el coeficiente de rozamiento equivalente de hormigón y porexpan.    \*\* Es el desplazamiento medido a los 100 ms.

Tabla 5.9. Comparación de resultados de simulación con y sin perfil de porexpan.

Igual que en simulaciones previas, se observa y se confirma que la disminución del valor ASI lleva asociado a un aumento del desplazamiento. La flexibilización de la barrera de los perfiles 121S6 y 121S1 respecto al perfil 51S1 ha conllevado una reducción del ASI del 10%. Si bien, el 122S1 consigue un ASI idéntico al perfil 121S6 (ASI = 1,40), el D<sub>máx</sub> del perfil 122S1 es de 94 mm frente al D<sub>máx</sub> del perfil 121S6 donde será superior ya que a los 100 ms ya tiene un

desplazamiento de 94 mm. Este hecho es debido al menor coeficiente de rozamiento del perfil 122S1 frente al perfil 121S6 que le permite una mayor facilidad a deslizamiento al impacto, obteniendo un mayor desplazamiento en el instante de ASI máximo.

Una de las principales características que también repercuten en mejorar el valor de ASI es la acción de corte o pre-corte de la barrera. Mediante esta labor, en el instante de impacto, la barrera se comporta como un elemento multi-bloque permitiendo absorber parte de la energía de impacto mediante la deformación provocada por el choque.

En referencia a la colocación del perfil de porexpan sobre el perfil 51 sólo se consigue una reducción del ASI del 2 % y un desplazamiento de la barrera de 17 mm. Por tanto, son necesarias otras modificaciones mecánicas de la barrera para poder reducir el índice ASI.

## 5.8.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO

En este apartado se presentan los resultados de los 4 ensayos de impacto, donde se han analizado los siguientes parámetros:

- Distancias de lanzamiento del vehículo
- Índices ASI y THIV
- Desplazamientos registrados
- Posición de contacto con el suelo
- Ejes de giro durante el impacto
- Marcas de rozamiento
- Parametrización del desplazamiento

### 5.8.1- Distancias de lanzamiento del vehículo

En la Tabla 5.10 se presentan las distancias de lanzamiento de cada uno de los ensayos, su velocidad de impacto y su ASI asociado.

Perfil de ensayo	ASI	d <sub>i</sub> (m)	v (Km/h)
120	1,50	9,0	100,7
121	1,62	3,5	100,0
122	1,49	3,3	100,4
123	1,79	10,5	102,0

Tabla 5.10. Distancias de lanzamiento.

De igual modo que en los ensayos de del capítulo 4, se observan grandes diferencias según la  $d_i$  de cada ensayo, desde los 3,3 m del perfil 122 hasta los 10,5 m del perfil 123. Respecto a las velocidades de impacto, se aprecia que el error producido entre el valor real medido y el teórico se sitúa entre el 0 % y el 0,7 %.

### 5.8.2- Índices ASI y THIV; y desplazamientos

En la Tabla 5.11 se muestran los resultados de los índices ASI y THIV; y de los desplazamientos medidos en la barrera. En el caso de los 2 índices de severidad, se han realizado la medición de dos posiciones distintas: un acelerómetro colocado en el cdg (en todos los perfiles) y otro acelerómetro situado a 7 cm detrás del cdg (perfiles 122 y 123). De esta forma con los perfiles 122 y 123 se puede comprobar si se produce una reducción de los índices de severidad de impacto tal y como sucedió con el ensayo 51 3<sup>er</sup> presentado en el capítulo 4. Respecto a los desplazamientos registrados de los 4 ensayos se presentan el desplazamiento máximo ( $D_{m\acute{a}x}$ ), el desplazamiento en el instante en que se produce el ASI máximo ( $D_{ASI}$ ) y los desplazamientos remanentes ( $D_r$ ) y elásticos ( $D_e$ ). Adicionalmente como comparación, se muestran los resultados de los perfiles 51-2 y 119.

Perfil	51 2°	119	120	121	122	123
THIV (Km/h)	26,42	28,36	26,76	28,29	25,91	-
*THIV (Km/h)	-	-	-	-	24,77	27,00
ASI	1,52	1,62	1,50	1,63	1,49	1,79
*ASI	-	-	-	-	1,40	1,44
$D_{ASI}$ (mm)	0	0	11	7	13	3
$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	0	0	11	67	94	7
$D_r$ (mm)	0	0	5	42	81	6
$D_e$ (mm)	0	0	6	25	13	1

\* Medición de los índices ASI y THIV a 7 cm detrás del cdg.

Tabla 5.11. Resultados THIV, ASI,  $D_{ASI}$ ,  $D_{m\acute{a}x}$ ,  $D_r$  y  $D_e$ .

Observando los resultados de los índices de severidad de los perfiles 51, 121, 122 y 123; el perfil que registra mejores valores es el 122 con una reducción del 2 % de ASI y THIV respecto al de los del perfil 51. En cambio, los otros dos perfiles producen ASIs y THIVs con un 7 % (perfil 121) y un 18 % (perfil 123) superiores al 51. En el caso de los perfiles 119 y 120, sí que se produce una bajada notable del ASI y el THIV, con un disminución del 7 %.

Fijándose en los resultados de los índices ASI y THIV medidos a 7 cm detrás del centro de gravedad; en el perfil 122 el ASI disminuyó un 6 % y el THIV un 4,4 %; mientras que para el perfil 123 el ASI se redujo un 20 %.

Analizando los  $D_{m\acute{a}x}$ , el perfil 122 es el que registró una mayor deflexión con un valor de 94 mm, seguido del perfil 121 con 67 mm, del perfil 120 con 11 mm y del perfil 123 con 7 mm. Si se comparan estos desplazamientos con los valores ASI del cdg, se detecta de que no existe una relación directa que implique que a mayor  $D_{m\acute{a}x}$  repercute en un ASI menor; tal y como se puede comprobar entre los perfiles 51 ( $D_{m\acute{a}x} = 0$  mm, ASI = 1,52) y 121 ( $D_{m\acute{a}x} = 67$  mm, ASI = 1,62).

En cambio si se observan los desplazamientos medidos en el instante de ASI máximo, se ve que existe una relación directa de cuánto mayor es el  $D_{ASI}$  menor es el ASI del cdg. Se aprecia que el perfil 122 es el que registra un mayor valor (13 mm), seguido de muy de cerca el perfil 120 (11 mm), y de los perfiles 121 (7 mm) y 123 (3 mm).

Por último, en los 4 ensayos se ha registrado una cierta recuperación elástica después de producirse el impacto. Según el tipo de perfil, la  $D_e$  representa el 55 % (perfil 120), el 37 % (perfil 121), el 14 % (perfil 122) y el 14 % (perfil 123) de la  $D_{m\acute{a}x}$  medida. Estos resultados responden que a mayor cuantía de armadura, se detecta una mayor recuperación elástica.

### 5.8.3- Posición de contacto con el suelo

En la Tabla 5.12 se muestran los resultados medidos de las distancias y de los ángulos transversales de los 4 ensayos. Además también se presentan los resultados de los perfiles 51 2° y 119 como perfiles de comparación. Adicionalmente, en la misma tabla se ha añadido los resultados ASI en el cdg, los desplazamientos máximos medidos y de la ocurrencia de vuelco.

Perfil de ensayo	ASI	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	$d_t$ (m)	$\Psi_t$ (°)	Vuelco
51 2°	1,52	0	1,5	40	No
119	1,62	0	1,0	45	Sí
120	1,50	11	0,9	57°	Sí
121	1,63	67	1,2	32°	No
122	1,49	94	1,4	22°	No
123	1,79	7	2,2	-1°	No

Tabla 5.12. Resultados de distancias y ángulos transversales.

Comparando las  $D_{m\acute{a}x}$  de los perfiles con cierta flexibilidad respecto a sus homólogos perfiles con desplazamiento nulo, se aprecian valores muy similares, tanto entre los perfiles 119 y 120; como con los perfiles 51, 121 y 122. En cambio, el perfil 123 registra una distancia transversal del orden un 50 % superior a los perfiles 51, 121 y 122.

Analizando los ángulos transversales se ve una tendencia a la baja a medida que se ha ido progresando en el diseño de un perfil de barrera más flexible. Comparando los ángulos



medidos entre las barreras que presentan deformación y las que no, se visualizan ciertas diferencias. Entre los ángulos de los perfiles 119 y 120, el perfil 120 produce un aumento un 27 % respecto al perfil con deflexión nula. Entre los perfiles 51, 121, 122 y 123, se producen unas disminuciones del ángulo transversal de un 20 % (perfil 121), de un 45 % (perfil 122) y de un 102,5 % (perfil 123) respecto del perfil 51 rígido.

Las disminuciones producidas en los perfiles 122 y, en menor medida, 121 se debe a la deformación de la barrera ante el impacto del vehículo. La deflexión dinámica que se produce en estos perfiles, del orden de 6 – 10 cm, influye sobre el coche con una mayor estabilidad ante el vuelco gracias a la absorción de una parte de la energía de impacto por parte de la barrera. Para el caso del perfil 123, el registro de un  $\Psi_t \approx 0^\circ$  pone de manifiesto estabilidad del coche con una rotación nula durante el impacto. La causa de que este ángulo sea prácticamente nulo se debe a las condiciones de ensayo modificadas y especialmente en la distribución de masas del vehículo. En este perfil se colocó un mayor peso en el lado izquierdo del coche para contrarrestar el sentido de rotación que da lugar al vuelco.

Después de este análisis, los resultados de los ensayos confirman que la condición de vuelco, expresada en función del ángulo  $\Psi_t$ , se traduce en que aquellos ensayos en los que se cumple  $\Psi_t < 45^\circ$ , el vehículo no vuelca.

#### 5.8.4- Ejes de giro durante el impacto

En la Tabla 5.13 se presentan los resultados medidos de los ángulos ( $\varphi$ ) y velocidades angulares ( $w$ ) siguiendo los criterios expuestos en el capítulo 4.

Perfil de ensayo	ASI	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	Eje X		Eje Y	Eje Z		Vuelco
			$\varphi_x$ (°)	$w_x$ (°/s)	$\varphi_y$ (°)	$\varphi_z$ (°)	$w_z$ (°/s)	
51 2°	1,52	0	44	50	14,6	16	13	No
119	1,62	0	51	53	12,5	20	0	Sí
120	1,50	11	66	66	15,4	19	9	Sí
121	1,62	67	32	49	10,5	20	3	No
122	1,49	94	22	20	11,6	21	-6,5	No
123	1,79	7	-5	-16	11,6	21	19	No

Tabla 5.13. Ángulos y velocidades de giro en los ejes X, Y y Z.

Analizando los resultados de  $\varphi_x$  y el vuelco, se observa que los 4 ensayos cumplen con las condiciones impuestas en el capítulo 4 para producirse el vuelco ( $\varphi_x \geq 50^\circ$  y  $w_x \geq 50$  °/s). Solamente de los 4 perfiles ensayados, el vehículo del perfil 120 vuelca, con valores claramente

superiores (mayores a un 30 %) al límite impuesto para volcar. En cambio los otros perfiles registran valores por debajo de los límites del vuelco.

Comparando los valores entre los perfiles 119 y 120, se aprecia un aumento de un 29% de  $\varphi_x$  y del 25 %  $w_x$  del vehículo del perfil flexible frente al del perfil rígido. Pero para los perfiles 121, 122 y 123 frente al perfil rígido 51 2º se produce el efecto contrario. Para el perfil 121 se reduce  $\varphi_x$  en un 27 % y  $w_x$  en un 2 %; y en el perfil 122 se disminuye el  $\varphi_x$  en un 50 % y la  $w_x$  en un 60 %. Esta reducción de los parámetros  $\varphi_x$  y  $w_x$  de los perfiles 121 y 122 respecto del perfil 51 2º se explica por la deformación producida en la barrera, donde parte de la energía de impacto lo absorbe e implica una menor energía rotacional del vehículo.

Para el caso del perfil 123 se registran valores negativos de  $\varphi_x$  y  $w_x$ , por tanto, se desprende que el giro del vehículo es el opuesto a los otros 3 ensayos. En el capítulo 4, de los 7 ensayos de impacto, sólo el perfil Inglés (R1) obtuvo valores negativos. Pero el comportamiento de giro  $\varphi_x$  del perfil 123 no se debe a la forma del perfil sino a las condiciones de ensayo modificadas. Donde la distribución de pesos en mayor peso al lado izquierdo del coche ha ayudado a contrarrestar el sentido de giro del vuelco y repercute en una mayor estabilidad del vehículo durante el impacto.

En los ángulos  $\varphi_y$ , se observa que los valores se encuentran comprendidos entre 10,5º y 15,4º. A diferencia de los perfiles ensayados en el capítulo 4, comparando estos ángulos con los índices ASI obtenidos no se aprecia la tendencia de que a mayor ángulo  $\varphi_y$  implica un menor ASI. El perfil que lo escenifica en mayor grado es el 122, con un  $\varphi_y = 11,6^\circ$  y un ASI = 1,49. Con el mismo valor de  $\varphi_y$  lo obtiene el perfil 123 pero con un ASI = 1,79.

Si se comparan los ángulos  $\varphi_y$  entre barreras con y sin deformación, se visualiza que entre los perfiles 119 y 120 aumenta el valor de  $\varphi_y$  en un 23 %. En cambio, entre el perfil 51 2º y los perfiles 121, 122 y 123, los valores de  $\varphi_y$  se reducen entre un 21 % y un 28 %.

Por último, centrándose en los resultados de giro del eje Z, los ángulos  $\varphi_z$  medidos son muy similares entre los 19º y 21º, por tanto el ángulo de salida del vehículo es prácticamente idéntico al ángulo de impacto de entrada ( $\beta_i = 20^\circ$ ), asimilándose a un choque totalmente elástico. En referencia a las velocidades angulares  $w_z$ , se detectan valores entre -6,5 deg/s y 19 deg/s. Entre los perfiles 119 y 120 se aprecia un leve aumento de la velocidad de giro pasando de 0 deg/s hasta los 9 deg/s. Pero entre el perfil 51 2º y los perfiles 121 y 122, la  $V_z$  se reduce entre 10 y 20 deg/s, seguramente debido por el atenuante de la deformación producida en la barrera. En el caso del perfil 123 respecto al perfil 51 2º, se produce un aumento de 6 deg/s.

Para poder entender mejor el comportamiento de giro de cada ensayo, en la Figura 5.12 se muestran los desarrollos de giro en los 3 ejes para los 4 ensayos de impacto con barrera flexible y los perfiles de referencia como barrera rígida. De esta manera se puede tener una visión más general de la evolución de los giros de los perfiles ensayados.

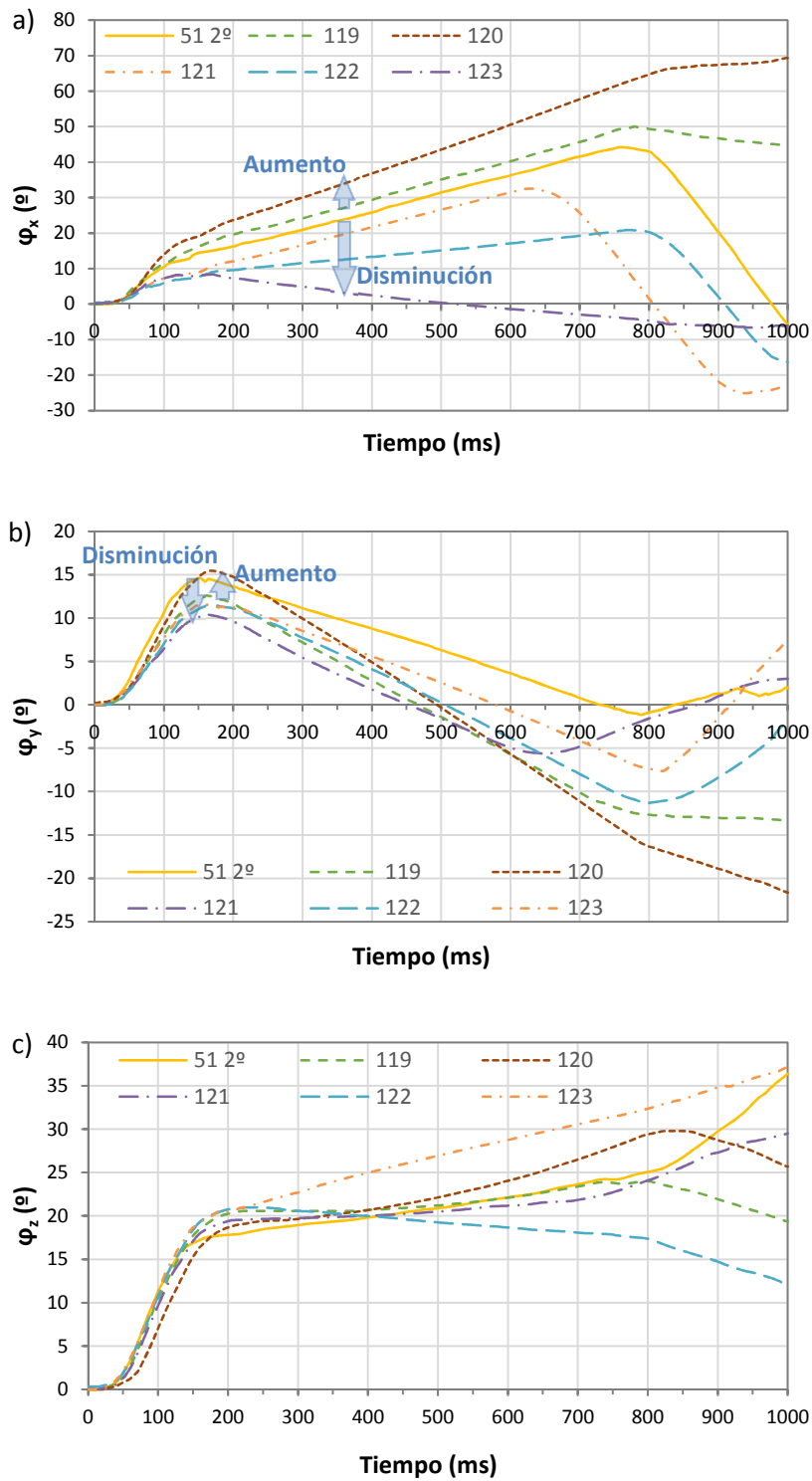


Figura 5.12. Giros en los ejes X, Y y Z de los perfiles 4 perfiles flexibles y los perfiles rígidos 51 2º y 119.

En la Figura 5.12.a se presentan los giros en el eje X, donde se observan dos tendencias distintas. Entre los perfiles 119 y 120 se ve un mayor giro en el caso del perfil flexible. Pero en cambio, entre el perfil 51 2º y los perfiles 121, 122 y 123 se aprecia una disminución del giro

registrado a medida que se ha ido avanzando en el diseño de barrera en base al perfil 51. Esta tendencia a la baja se traduce en una mayor estabilidad del vehículo durante el impacto, sobretodo en el perfil 123.

Fijándose en los giros del eje Y de la Figura 5.12.b, se detectan dos comportamientos parecidos. Entre los perfiles 119 y 120, el perfil 120 presenta unos mayores ángulos de inclinación  $\varphi_y$  con una diferencia máxima de  $3^\circ$  en los picos máximos de Y alrededor de los 150 a los 175 ms. En el lado opuesto, los perfiles flexibles (121, 122 y 123) frente al perfil rígido 51 2º producen giros de  $\varphi_y$  inferiores con diferencias en el pico máximo de  $\varphi_y$  entre  $3^\circ$  y  $4^\circ$ .

Para finalizar, en la Figura 5.12.c la evolución de los giros en el eje Z hasta los 200 ms, muestran una gran similitud. Pero después de este instante, en la fase III donde el vehículo deja de contactar con la barrera, destacan el comportamiento de dos perfiles. El primero de ellos es el perfil 122 cuyo giro  $\varphi_z$  es con signo negativo a diferencia de los demás. Este comportamiento se debe al gran desplazamiento máximo registrado (9,4 cm) en este ensayo dando como resultado una mejor redirección del vehículo respecto de los otros ensayos. El segundo de los perfiles a destacar es el perfil 123. En este perfil se produce una mayor giro  $\varphi_z$  que los demás ensayos. Este hecho se explica por las modificaciones de ensayo realizadas. La principal causa se puede asociar al aumento de la masa total del vehículo y una mayor distribución de peso en la parte izquierda - trasera del coche.

### 5.8.5- Marcas de rozamiento

En la Tabla 5.14 se exponen las longitudes y ángulos de rozamiento de 6 ensayos de impacto: los 2 ensayos de referencia (perfiles 51 2º y 119) y los 4 ensayos con comportamiento flexible (perfiles 120, 121, 122 y 123). En la Figura 4.14 del Capítulo 4 se muestran las longitudes y ángulos de inclinación considerados sobre la barrera.

Perfil	ASI	$D_{\text{máx}}$ (mm)	$L_t$ (m)	$L_p$ (m)	$L_{dp}$ (m)	$L_s$ (m)	$L_d$ (m)	$\gamma_p$ (º)	$\gamma_{dp}$ (º)
51 2º	1,52	0	3,5	1,4	2,1	3,0	0,5	10	7 - 8
119	1,62	0	3,7	0,9	2,8	3,1	0,6	11 - 13	9
120	1,50	11	3,4	0,8	2,6	2,8	0,6	16	13
121	1,62	67	4,0	1,2	2,8	3,6	0,4	9 - 11	7 - 8
122	1,49	94	4,4	1,2	3,2	4,0	0,4	9	5 - 6
123	1,79	7	3,4	1,3	2,1	3,0	0,4	10	8 - 9

Tabla 5.14. Resultados de las marcas de rozamiento.

Analizando las marcas de rozamiento entre los perfiles 119 y 120, se observa una gran similitud de las longitudes medidas con una variación máxima del 12 % ( $L_p$ ). Las longitudes del perfil 120 son todas ellas inferiores al perfil 119, dando lugar a una reducción de  $L_t$  del 9 %

respecto a la barrera rígida. Pero las similitudes en las longitudes contrastan con los ángulos de inclinación registrados. Para el perfil 120 se miden aumentos entre un 23 y un 45 % del ángulo del plinto, y un incremento del 44 % del ángulo después del plinto. Estos valores describen una mayor elevación del vehículo en el caso del perfil flexible frente al perfil rígido.

Evaluando los resultados de los perfiles 51 2°, 121, 122 y 123 se distinguen claramente dos comportamientos. Por un lado, las longitudes y ángulos de rozamiento medidos de los ensayos 51 2° y 123; y los registrados para los perfiles 121 y 122.

Para el perfil 123 se obtienen valores idénticos al del perfil 51 2°, con una diferencia de longitudes de 0 a 10 cm y ángulos 0 a 1°. Esta similitud de resultados es debido a la rigidez que presenta el perfil 123 ante el impacto con un  $D_{m\acute{a}x}$  de 7 mm. Por tanto, es lógico pensar que para una deformación de barrera tan pequeña, las marcas de rozamiento se parezcan al de una barrera rígida con la misma forma de perfil.

Para los perfiles 121 y 122, también se dan longitudes muy similares con diferencias entre los 0 a 40 cm. Los 40 cm de variación entre un perfil y otro se produce en la parte superior de la barrera. De modo análogo sucede con los ángulos de rozamiento, donde los ángulos en la zona se registra una variación de 0 a 2°, mientras que en el ángulo después del plinto esta diferencia es ligeramente mayor entre 1 y 3°. La menor inclinación del  $Y_{dp}$  del perfil 122 se traduce en una mayor longitud de rozamiento respecto al perfil 121. Este comportamiento del vehículo debe ir ligada al desplazamiento de la barrera, teóricamente una mayor deflexión dinámica se ve acompañada de una mayor longitud de recorrido (Shojaati, 1999).

#### 5.8.6- Parametrización del desplazamiento de la barrera

A partir de los resultados de desplazamiento en el tiempo de los 4 ensayos de impacto con los perfiles 120, 121, 122 y 123; y de los perfiles simulados 121S1, 121S2, 121S3, 121S4 y 122S1; en la Tabla 5.15 se presentan los valores de  $k_D$ ,  $c_D$  y  $p_D$  de la función  $D(t)$  4-paramétrica de cada perfil. Con la implementación de los valores de estos 3 parámetros y el desplazamiento máximo, se puede simular analíticamente la evolución del desplazamiento de la barrera.

Perfil	120	121	122	123	121S1	121S2	121S3	121S4	122S1
$c_D$	13	33	38	18	61	57	28	36	25
$k_D$	0,006	0,034	0,045	0,004	0,15	0,128	0,047	0,078	0,009
$p_D$	4,4	3	2,7	5,8	2,07	2,08	2,27	2,27	3,9
$D_{m\acute{a}x}$	0,011	0,067	0,094	0,007	0,37	0,31	0,105	0,178	0,017

Tabla 5.15. Valores  $c_D$ ,  $k_D$  y  $p_D$  de la función  $D(t)$  de cada perfil.

Tal y como se aprecia en la Tabla 5.15 a mayores valores de  $D_{m\acute{a}x}$  se aprecian valores de  $k_D$  y  $c_D$  más altos y valores de  $p_D$  más bajos. Este comportamiento es lógico ya que para barreras

más flexibles, la deformación de la barrera en el punto de inflexión es mayor dando a lugar a mayores valores de  $k_D$ , y también se producen en mayores intervalos de tiempo para alcanzar el punto de inflexión y el  $D_{m\acute{a}x}$  (mayores valores de  $c_D$ ). Respecto al valor  $p_D$ , cuanto mayor sea este valor mayor es la rigidez de la barrera dando lugar una deformación de la barrera en un periodo de tiempo más corto, con una pendiente mayor de la función 4-paramétrica.

En la Figura 5.13 se muestran las relaciones existentes entre  $k_D - D_{m\acute{a}x}$ ,  $c_D - D_{m\acute{a}x}$  y  $p_D - D_{m\acute{a}x}$ , en base a los datos de los perfiles presentados en la Tabla 5.15. En cada gráfica se traza una función que determina el valor del parámetro considerado a partir del  $D_{m\acute{a}x}$ .

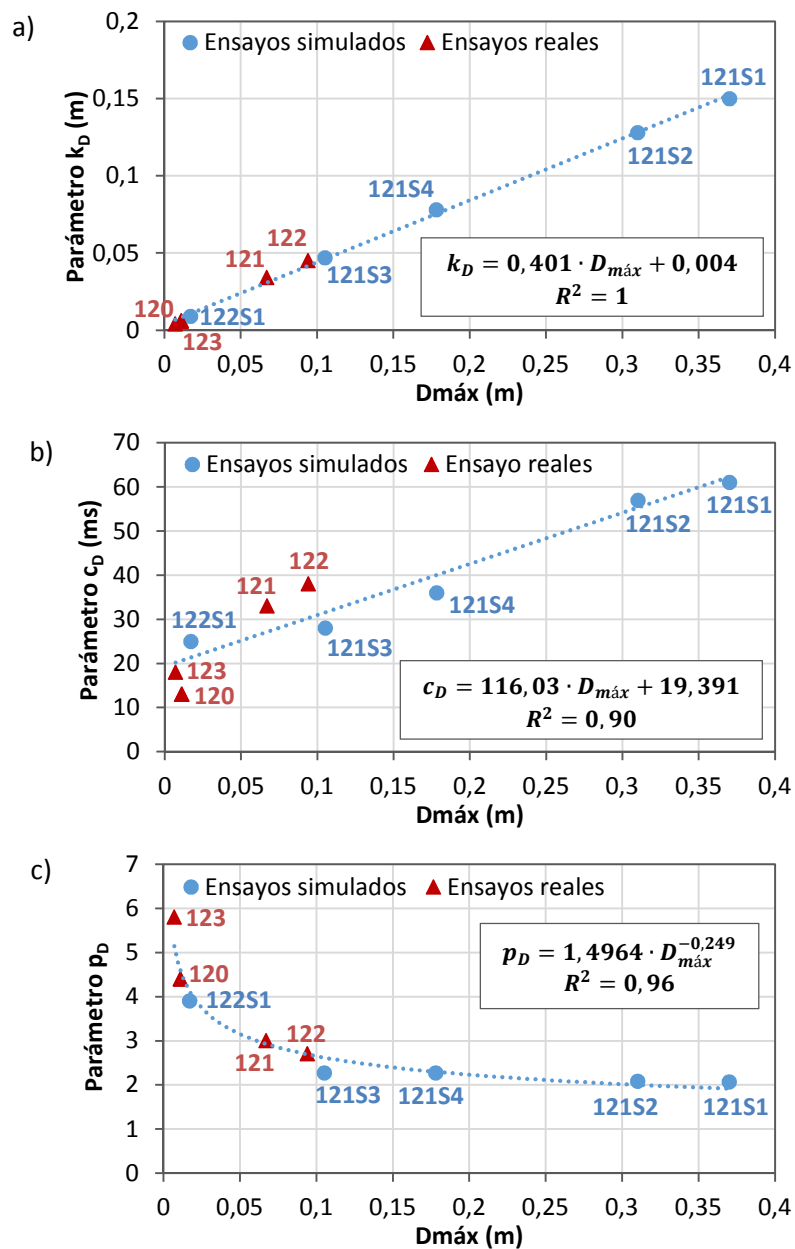


Figura 5.13. Relación de  $k_D$ ,  $c_D$  y  $p_D$  en función del  $D_{m\acute{a}x}$ .

En las 3 gráficas de la Figura 5.13 se visualiza las tendencias apreciadas entre las variables  $k_D - D_{m\acute{a}x}$ ,  $c_D - D_{m\acute{a}x}$  y  $p_D - D_{m\acute{a}x}$ ; donde a mayor  $D_{m\acute{a}x}$ , mayor es el parámetro  $k_D$  y  $c_D$ ; y menor es el parámetro  $p_D$ . En la Figura 5.13.a se puede ver que los valores de  $k_D$  (valor de desplazamiento en el punto de inflexión de la función valor) son prácticamente el 40 % del  $D_{m\acute{a}x}$ . Esta relación se traduce en una recta de pendiente de 0,4 y una desviación típica de 1. Para la Figura 5.13.b se observa una relación lineal con pendiente positiva entre  $c_D$  y  $D_{m\acute{a}x}$ , con una desviación típica de 0,90. Para la Figura 5.13.c se visualiza una relación logarítmica decreciente entre  $p_D$  y  $D_{m\acute{a}x}$ , con una desviación típica de 0,96. Por tanto, las tres funciones que correlacionan los dos pares de variables se aproximan razonablemente bien a los valores registrados tanto a nivel experimental como numérico.

Habiendo establecido los valores de los parámetros  $k_D$ ,  $c_D$  y  $p_D$  en función de  $D_{m\acute{a}x}$ , queda como variable incógnita el  $D_{m\acute{a}x}$ . Para obtener dicho valor, en esta tesis se propone una fórmula empírica (ver ecuación 5.6), donde  $D_{m\acute{a}x}$  depende de la fuerza de rozamiento del trozo de barrera entre cortes o pre-cortes ( $p_\mu$ ) y del momento plástico de la junta de la zona del corte o pre-corte ( $M_{pl}$ ). A continuación se presenta la Tabla 5.16 donde se muestran los valores de cada uno de los perfiles ensayados en este capítulo y el error relativo cometido entre los valores  $D_{m\acute{a}x}$  reales y los de la fórmula. Los cálculos de las variables  $p_\mu$  y  $M_{pl}$  son presentes en el Anejo 5.

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{24,66}{p_\mu^{(0,3982+0,005739 \cdot M_{pl})}} \quad [\text{Ec. 5.6}]$$

Parámetros	Unidades	120	121	122	123
$M_{pl}$	kNm	122,4	22,8	23,6	199,7
$p_\mu$	kN	17,8	11,7	6,1	9,5
$D_{m\acute{a}x}$ fórmula	cm	1,04	6,71	9,395	0,762
$D_{m\acute{a}x}$ real	cm	1,1	6,4	9,4	0,7
$\frac{D_{max,formula} - D_{max,real}}{D_{max,real}} \cdot 100$	%	-5,7	+0,18	-0,05	+8,9

Tabla 5.16. Resultados de la fórmula  $D_{m\acute{a}x}$ .

En la Tabla 5.16 se observa que el error cometido por los valores previstos por la fórmula se encuentra entre un rango de -5,7 % y + 8,9 % respecto a los valores reales. Por tanto, se puede decir que la fórmula  $D_{m\acute{a}x}$  predice con buena precisión el desplazamiento de una barrera tipo en base a los resultados estudiados.

### 5.8.7- Determinación del índice ASI

Para acabar con este capítulo, se pretende determinar el valor de ASI a partir de un perfil tipo de diseño. Para ello, se recuerda que en la Figura 5.1 se ha presentado los resultados de

296 ensayos que relacionan las  $D_{\text{máx}}$  con los ASIs; donde se traza una función como variable la  $D_{\text{máx}}$  que determina el valor ASI. Sin embargo, gracias a la investigación realizada en esta tesis, es más preciso determinar el valor de ASI si sabe el valor del desplazamiento en el instante de ASI máximo,  $D_{\text{ASI}}$ .

En base a los 4 ensayos de impacto reales y los ensayos simulados, se muestra en la Figura 5.14 la relación entre el ASI y el  $D_{\text{ASI}}$ . Los resultados ASI son tomados desde el cdg del vehículo excepto para los perfiles 122\* y 123\* que corresponden al ASI registrado a 7 cm detrás del cdg. La recta trazada para correlacionar ASI y  $D_{\text{ASI}}$  no incluye los puntos asociados a las medidas realizadas a 7 cm del cdg para garantizar la homogeneidad de los datos experimentales.

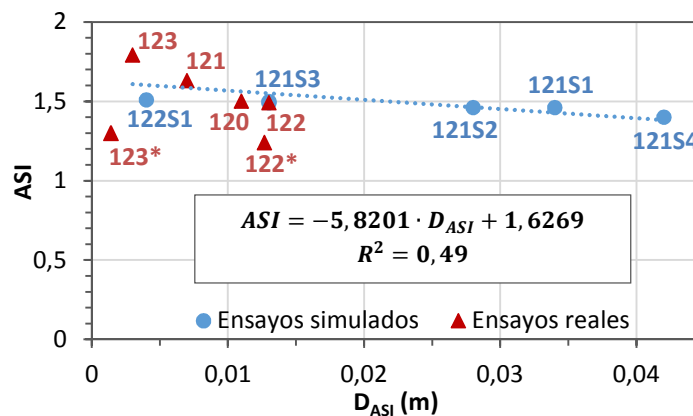


Figura 5.14. Relación ASI –  $D_{\text{ASI}}$ .

Para poder determinar el valor de  $D_{\text{ASI}}$  es necesario saber el instante donde se produce el ASI máximo para poder corresponder en la función valor su valor de desplazamiento. Tanto para los ensayos reales como los simulados, el intervalo de tiempo donde se encuentra el ASI máximo es muy pequeño entre los 47 ms y los 62 ms.

## 5.9.- CONCLUSIONES

En base a los resultados experimentales obtenidos y las simulaciones numéricas llevadas a cabo, se concluye que:

- Para alcanzar el objetivo de un perfil de clase B han sido necesario actuar sobre tres aspectos clave:
  1. Adoptar la forma del perfil que induce a un menor ASI (el perfil 51 del capítulo 4).
  2. Realizar modificaciones de la barrera para dotarla de cierta flexibilidad.
  3. Modificar las condiciones de ensayo dentro de las tolerancias que permite la norma EN 1317 (2010).



- En base a estas 3 consideraciones, los perfiles que cumplen como barrera de clase B son los perfiles 122 y 123. Entre estos perfiles, el perfil 122 (valor ASI) consigue unos índices de severidad menores que el perfil 123 (valor ASI) pero resulta demasiado caro por el empleo de fibras plásticas. Por tanto, la solución más viable para llevarla a cabo para su futura instalación en carreteras es el perfil 123.
- A partir de un diseño de perfil tipo, se puede saber el desarrollo del desplazamiento de la barrera en el tiempo a partir de la función 4-paramétrica presentada. Además, sabiendo el valor del desplazamiento máximo se puede prever el valor del ASI para el perfil tipo diseñado.
- Un mayor desplazamiento de la barrera y un mayor peso en el lado izquierdo del vehículo inducen a una mayor estabilidad del coche evitando el vuelco del mismo después de impactar contra la barrera.

## CAPÍTULO 6

### Diseño estructural

#### 6.1.- INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores (Capítulos 3, 4 y 5) se ha buscado el perfil de barrera que consiga la denominación clase B, de acuerdo con la norma EN 1317 (2010). En base a los resultados analizados del modelo de simulación, de los ensayos de impacto y tras aplicar modificaciones geométricas de la sección transversal, se han conseguido 2 perfiles de barrera que cumplen con dicho objetivo, los perfiles 122 y 123.

Hasta este nivel de estudio, el diseño de la barrera se ha centrado en aumentar sus prestaciones de seguridad reduciendo los índices de severidad de impacto. Otro factor, es el estudio del cálculo estructural de la barrera ante el impacto de un vehículo. Para ello es necesario evaluar las sollicitaciones actuantes sobre la barrera y determinar cuál es su resistencia frente a estas. Así, el **objetivo principal** del presente capítulo es determinar la resistencia a rotura de una barrera de hormigón con los perfiles 51, 122 y 123.

Para poder alcanzar este propósito se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el modo y la carga de rotura asociada de cada perfil y tipo de carga aplicada.
- Determinar el espesor mínimo de coronación para resistir el impacto.
- Posibilidad de la sustitución del armado convencional por fibras de carácter estructural.

Para alcanzar los objetivos planteados se ha seguido la siguiente **metodología**:

- 1º. Establecer los modos y valores de diseño de la carga de impacto (ensayo TB11).
- 2º. Adoptar el método de las líneas de rotura para evaluar la carga en situación de fallo.
- 3º. Proponer los modos de rotura compatibles con el sistema estructural.
- 4º. Análisis de los resultados obtenidos.

## 6.2.- CARGA DE IMPACTO

### 6.2.1- Carga de diseño para el cálculo

La carga de diseño para emplear en el cálculo estructural de la barrera deberá tener en cuenta el tipo de vehículo que impacta y el modo en cómo se produce este choque. Para esta tesis, el ensayo de impacto corresponde al del vehículo TB11 preconizado por la norma 1317.

Para poder determinar el valor medio de la fuerza de impacto (F), se presentan en la Tabla 6.1 los valores F propuestos en diferentes normas e instrucciones. Asimismo, se recoge también el valor medio de F (aceleración media de 50 ms,  $\pm 25$  ms del tiempo de la aceleración máxima) de los ensayos realizados en motivo de esta tesis.

Carga de impacto	Modo de carga	Fuente
$F = 0,5 \cdot M \cdot \frac{v^2}{\delta_c + D_r} = \mathbf{91 \text{ kN}}$ (con valores orientativos) Para $D_r = 0 \text{ mm}$ , $F = \mathbf{150 \text{ kN}}$	Lineal en 1,5 m Altura de aplicación es la del parachoques	Eurocódigo 1. Parte 1.1. Acciones Generales. Anexo B (EN 1991-1-1:2002)
$F = v \cdot \sqrt{K \cdot M} = \mathbf{156 \text{ kN}}$ $K \approx 300 \text{ kN/m (orientativo)}$	Puntual Altura de aplicación a 1,25 m del suelo	Eurocódigo 1. Parte 1.7. Acciones Accidentales (EN 1991-1-7:2006) Anejo C
$F = \frac{M \cdot (v \cdot \sin \beta_i)^2}{2 \cdot [A \cdot \sin \beta_i + (\cos \beta_i - 1) \cdot B + D_r]} = \mathbf{87 \text{ kN}}$ $F_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot F = \mathbf{136 \text{ kN}}$	-	NCHRP Report 86 (1970) Hirsch (1978)
$F = M \cdot a = \mathbf{119 \text{ kN}}$ (valores medidos entre 106 y 144 kN)	-	Ensayos de impacto de la presente tesis (Anejo 3)

Tabla 6.1. Valores de impacto para el ensayo TB11 de la norma EN 1317.

En la Tabla 6.1 se observa que los valores de F recogidos en los eurocódigos y en la NCHRP oscilan entre los 87 y 156 kN. Por tanto, existe una diferencia notable entre el valor máximo y mínimo de casi 70 kN (80% respecto al mínimo). Por tanto, resulta difícil escoger un valor de carga de impacto en base a este rango amplio de valores.

En base a los valores de impacto obtenidos en esta tesis, se ha acotado el intervalo de valores de  $F$  entre 106 y 144 kN (diferencia de 38 kN, y un 36 %). El valor medio del intervalo de  $F$  es de 119 kN, valor que se asume como carga de diseño para el análisis en rotura.

El modo de carga difiere según la fuente (ya sea en forma puntual, lineal o superficial) con puntos de aplicación desde la altura del parachoques del vehículo hasta la coronación. En la realidad, el choque se produce de manera superficial de forma desigual; Noel et al. (1981) determina que el choque del vehículo es representado como una presión de contacto con forma de un semiovoide. Para una mayor simplicidad en el cálculo de rotura, se diseñará una carga de impacto puntual y lineal, con longitudes lineales entre 0,5 y 1,5 m (valores límites establecidos de los eurocódigos 1 Parte 2 y Parte 1.1, respectivamente). La altura de aplicación se propone en los casos más desfavorables pensando en el caso de impacto de un vehículo pesado, actuando la carga en la coronación, y a 0,1 y a 0,2 m por debajo de dicho punto.

Como resumen de la carga de diseño a realizar para el cálculo a rotura de la barrera de hormigón, se presentan en la Tabla 6.2 los valores de carga de impacto y su modo de carga para el choque de un vehículo ligero (ensayo TB11).

Ensayo	Carga de impacto (kN)	Modo de carga (m)			Altura de aplicación (m)		
		Puntual	Lineal		Coronación	0,1	0,2
TB11	119			0,5			

Tabla 6.2. Carga de diseño para el cálculo a rotura.




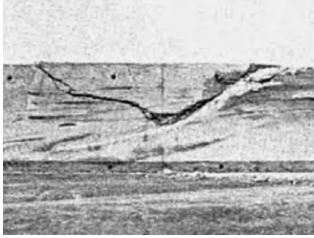

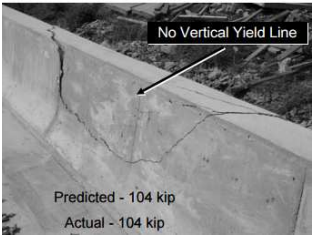


De modo adicional, a posteriori del trabajo realizado por esta tesis, se ha efectuado el cálculo del ensayo TB51 del autobús para conseguir que la barrera tenga un nivel de contención H2. Para ello, se presentan en el Anejo 6 los cálculos pertinentes.

## 6.3.- MÉTODO DEL CÁLCULO DE ROTURA

### 6.3.1- Casos reales de rotura

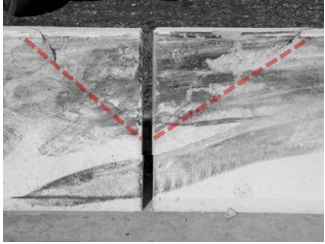
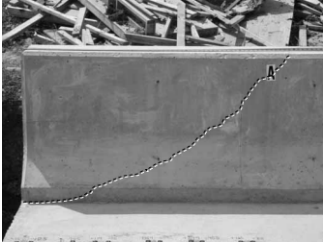

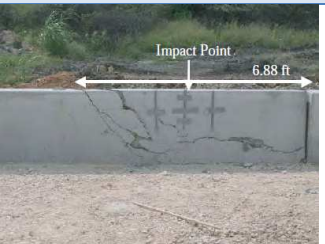
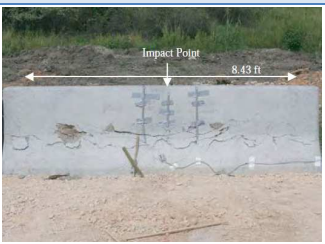
De acuerdo con el modo de rotura en caso de impacto de un vehículo contra una barrera de hormigón *in situ* presentado en el apartado 2.8.2 del Capítulo 2, se deduce que la forma de rotura parece seguir un patrón común. La forma más habitual recuerda a la de un “mordisco”, variando sus medidas longitudinales y de altura según el tipo de vehículo y el modo de choque, pareciéndose al propuesto por Jeon et al. (2008).

En la Tabla 6.3 se presentan distintas fotografías de varios impactos reales, donde se observa el mismo patrón de rotura.

Casos reales de rotura de barreras continuas		
		
a) Choque de un camión tráiler. (Ray et al., 2013)	b) Choque de un camión tráiler. (Gazette, 2012)	c) Choque de un camión. (Modbee, 2012)
		
d) Choque de un autobús. (RECO, 1995)	e) Impacto de un todoterreno. (Kmov, 2012)	f) Ensayo test carga lineal aplicada en coronación. (Alberson, 2006)
		<i>Tabla 6.3. Fotografías de rotura de barreras de hormigón continuas.</i>
g) Ensayo test (1) carga lineal aplicada en coronación. (Alberson et al., 2004)	h) Ensayo test (1) carga lineal aplicada en coronación. (Alberson et al., 2004)	

Las fotografías 6.3.a, 6.3.b y 6.3.c corresponden a choques de un camión, mientras que la 6.3.d pertenece al impacto de un autobús y la 6.3.e al de un todoterreno. Las imágenes 6.3.f y 6.3.g,h son los resultados de dos ensayos aplicando una carga lineal en la coronación de la barrera. En todas las figuras se reproduce el “mordisco” anteriormente mencionado. La diferencia entre ellas radica principalmente en la distancia longitudinal de la barrera ( $L_c$ ) y su altura de rotura desde la coronación hacia la base ( $H$ ). Ambos valores dependerán del tipo de vehículo, el ángulo y la velocidad en el que impacte así como de las características de la barrera de hormigón.

Para barreras de hormigón que presenten discontinuidades en el sentido longitudinal, el modo de rotura difiere según el punto de impacto. En la Tabla 6.4 se muestran los casos encontrados. La rotura recogida en la a es el resultado de impacto de un vehículo tipo pickup, las fotografías b y c son resultados de ensayos con carga lineal aplicada en coronación, y las fotografías d y e son ensayos con carga lineal aplicada en coronación en una zona intermedia entre el centro y el extremo y la otra en el centro del elemento de barrera.

Casos reales de rotura en barreras discontinuas		
		
a) Choque de un vehículo pickup. (Alberson et al., 2004)	b) Ensayo test carga lineal aplicada en la junta zona de coronación. (Alberson, 2006)	c) Ensayo test (1) carga lineal aplicada en coronación. (Alberson et al., 2004)
		<i>Tabla 6.4. Fotografías de rotura de barreras de hormigón discontinuas.</i>
d) Ensayo test carga lineal en coronación aplicada entre centro y el extremo de la junta. (Bligh et al., 2010)	e) Ensayo test carga lineal en coronación aplicada en el centro. (Bligh et al., 2010)	

Para el caso del impacto real de un coche pickup (Tabla 6.4.a), en la zona de discontinuidad se aprecia una rotura en forma triangular. De igual modo ocurre en los casos de los dos ensayos b y c; por tanto, el modo de rotura se asimila al planteado por el de la AASHTO y Jeon et al. (2008).

Si la carga aplicada se aleja de la zona de discontinuidad de la barrera (Tabla 6.4.d), el modo de rotura difiere notablemente del presentado en la 6.4.b, donde el modo se asimila al “mordisco” que se presenta en barreras continuas; si bien, acotado geoméricamente por la discontinuidad del extremo. Para el caso de la 6.4.e, el colapso de la barrera es totalmente diferente a los otros observados de la misma Tabla 6.4. Se aprecia que hay una única línea de rotura horizontal en la zona superior del plinto. La causa de este modo de rotura se debe a la menor rigidez que presenta la forma del perfil (menor canto desde el plinto hasta la coronación) y a un longitud reducida de la barrera (2,5 m).

### 6.3.2- Forma de rotura y modo de cálculo adoptado

En base a los modos de rotura observados en las Tablas 6.3 y 6.4, en la Figura 6.1 se plantean los patrones de líneas de rotura en función de la distancia entre el punto de impacto y la discontinuidad. En la figura se observa la evolución natural que sigue el colapso esperado de la barrera en base a la experiencia de casos reales.

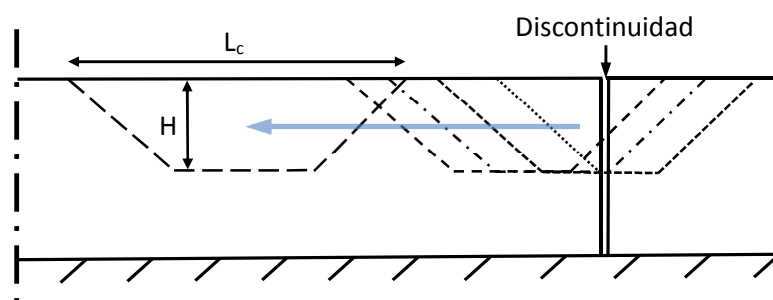


Figura 6.1. Modo de rotura según el punto de impacto con una barrera con juntas.

La forma trapezoidal su puede asemejar a la forma del “mordisco”. La distancia longitudinal ( $L_c$ ) y la altura ( $H$ ) dependerán del tipo de vehículo, la forma de impacto y también de las características geométricas y mecánicas de la barrera. En base a la experiencia y a las formas de rotura observadas en las Tablas 6.3 y 6.4,  $L_c$  oscila entre 2 y 3 m y  $H$  entre 0,2 y 0,5 m.

Respecto al cálculo de rotura, en esta tesis se asume el método de las líneas de rotura, utilizando el teorema de los trabajos virtuales para hallar el valor de la carga. Para este cálculo se diferencia el valor de los momentos lineales según su signo. En la Figura 6.2 se muestra el proceso de rotura tipo, donde la aparición de las línea de rotura escalonada.

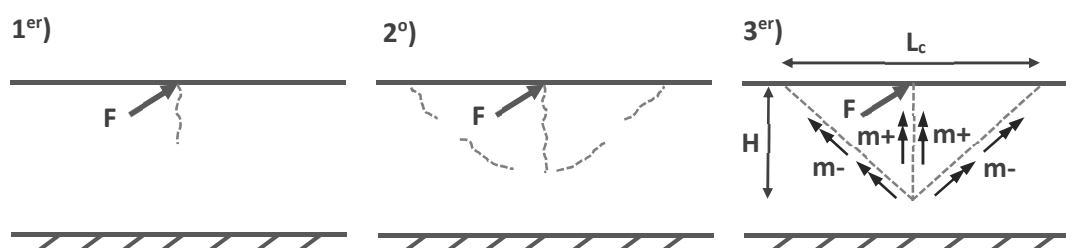


Figura 6.2. Proceso de formación de las líneas de rotura.

En la Figura 6.2 se observa que cuando la carga de impacto actúa sobre la barrera, primero se produce una fisura vertical. Luego, esta fisura vertical se alarga dando lugar a una línea de rotura vertical y aparecen otras fisuras oblicuas. Finalmente, cuando las fisuras oblicuas se juntan, se forman las otras dos líneas de rotura dando lugar a un mecanismo.

Cuando se forma este mecanismo, el momento lineal positivo ( $m+$ ) de la línea de rotura vertical, la sección ya ha fisurado y está en régimen plástico. En cambio, en el momento lineal negativo ( $m-$ ) de las líneas de rotura oblicuas, el material de esta sección está fisurado. Por tanto, para su cálculo el momento lineal positivo ( $m+$ ) se considera el momento último de la sección ( $M_u$ ); y para el momento lineal negativo ( $m-$ ) se considera el momento de fisuración de la sección ( $M_{fis}$ ). La consideración de  $m-$  con el  $M_{fis}$  también es válida incluso con la presencia de armadura longitudinal. La armadura dispuesta de 2 o 3 barras  $\phi 12$  solo contribuyen de manera residual ya que el contenido de armado es muy bajo respecto a las secciones de hormigón de los perfiles 51, 122 y 123.

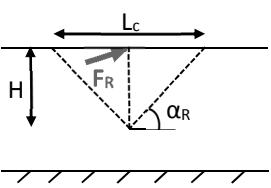
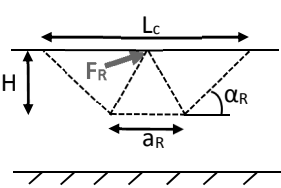
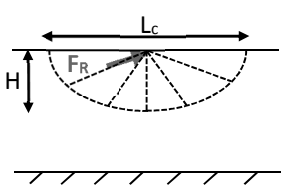
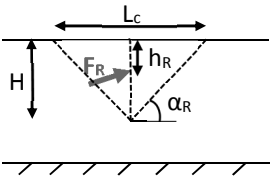
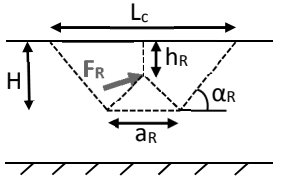
### 6.4.- CASOS A ESTUDIAR

Para esta tesis se ha procedido a estudiar los casos de los perfiles 51, 122 y 123. El perfil 51 se ha analizado por tratarse del mejor perfil conseguido de esta tesis para una barrera continua sin presentar deformaciones ante el impacto del vehículo ligero (ensayo TB11). Los perfiles 122 y 123 se han examinado por ser los dos perfiles que han conseguido la calificación de clase B de la norma EN 1317. De modo adicional, para estos casos se comparará con el impacto de un vehículo más pesado, en particular el caso del impacto de un autocar (ensayo TB51) para comprobar si resiste tal choque.

Antes de proceder al estudio de estos 3 perfiles se debe tener en cuenta de la condición de Obiol (1978) de que la relación entre el canto y la distancia menor entre dos extremos opuestos de la placa sea menor de  $1/5 = 0,2$ . El perfil 51 (perfil base de los perfiles 122 y 123), la relación entre el grosor medio del perfil y su altura desde la base hasta la coronación es de 0,3 para el perfil simple y de 0,4 para el perfil doble. Por tanto, a priori, no cumple con la condición para que la barrera se asimile a una placa. Pero de todos modos, en esta tesis se procede al cálculo como una placa ya que es la metodología utilizada por organismos oficiales de prestigio (AASHTO).

#### 6.4.1- Perfil 51

Con el perfil 51 se han analizado un total de 15 casos de rotura según la forma de fallo y el tipo de carga aplicada. Considerando una carga puntual se tienen 5 casos de rotura (Tabla 6.5) y para una carga lineal se proponen 10 casos (Tabla 6.6). A cada tipo se le asigna una nomenclatura que define su geometría. Básicamente, las formas de rotura propuestas son triangulares, trapezoidales o circulares. La distribución de las líneas de rotura interiores (con momento positivo) difieren de cada caso.

Carga puntual en coronación		
		
Caso 1. Rotura triangular.	Caso 2. Rotura trapezoidal.	Caso 3. Rotura circular.
Carga puntual a una altura h de la coronación		
		<i>Tabla 6.5. Casos de rotura con carga puntual.</i>
Caso 4. Rotura triangular.	Caso 5. Rotura trapezoidal.	



Carga lineal en coronación		
Caso 6. Rotura triangular.	Caso 7. Rotura trapezoidal.	Caso 8. Rotura trapezoidal.
Caso 9. Rotura trapezoidal.	Caso 10. Rotura circular.	
Carga lineal a una altura h de la coronación		
Caso 11. Rotura triangular.	Caso 12. Rotura trapezoidal.	Caso 13. Rotura trapezoidal.
		<i>Tabla 6.6. Casos de rotura con carga lineal.</i>
Caso 14. Rotura trapezoidal.	Caso 15. Rotura trapezoidal.	

Tanto en la Tabla 6.5 como la Tabla 6.6 se observa que las formas propuestas parten de la rotura más simple planteada por la AASHTO (forma triangular), pasando con formas trapezoidales con distintas combinaciones de distribución de las líneas de rotura e incluso proponiendo conos de hundimiento (forma circular). Esta secuencia responde con la intención de acercarse a la forma de rotura en forma de mordisco que sucede en los casos de impacto real.

En base a la definición de los parámetros geométricos de cada caso, según los valores que se asignen, se puede trasladar de un caso a otro. Para obtener este amplio rango de formas se presentan en la Tabla 6.7 los intervalos de valores de cada uno de los parámetros geométricos. Como se ve, para cada caso, se estudian otros subcasos según el valor de los parámetros  $H$ ,  $\alpha_R$ ,  $h_R$ ,  $a_R$ ,  $a'$  y  $L_f$ . El parámetro  $L_c$  queda definido por las variables  $H$ ,  $\alpha_R$  y  $a_R$ , según el tipo de rotura.

Parámetro geométrico	Valores		Parámetro geométrico	Valores			
	H	0,2		0,5	$a_R$	0,5	1
$\alpha_R$	De 5º a 85º		$a'$	0,5	1	1,5	
$L_c$	Depende de H, $\alpha$ y a		$L_f$	0,5	1	1,5	
$h_R$	0,1	0,2	<i>Tabla 6.7. Rango de valores geométricos de rotura.</i>				

Además, para cada caso se analizarán las diferentes características materiales de la barrera y la forma del perfil. En la Tabla 6.8 se puede ver los materiales empleados ya sea hormigón en masa, armado o con fibras plásticas/acero; además del empleo de un perfil simple o doble.

Materiales de la barrera	Hormigón en masa
	Hormigón con armadura longitudinal: 2 $\phi$ 12, 3 $\phi$ 12
	Fibras de acero: 15, 25 y 35 Kg/m <sup>3</sup>
	Fibras plásticas: 2, 4, 6, 8, 10 y 12 Kg/m <sup>3</sup>
Perfil	Simple / Doble

*Tabla 6.8. Características materiales y geométricas estudiadas para cada caso de rotura.*

Las 4 propuestas de materiales empleados para la barrera permitirán ver si existe una gran diferencia de resistencias por el hecho de añadir armado o fibras al hormigón. El armado considerado se proponen las dos barras 2 $\phi$ 12 longitudinales que se usan habitualmente y la propuesta de añadir otra barra de acero (añadida en el caso del perfil 123 de esta tesis) para ver qué incremento de resistencia aporta respecto a la disposición del armado convencional. La adición de fibras en el hormigón tiene como objetivo la posibilidad de sustituir el armado longitudinal actual de las dos barras longitudinales 2 $\phi$ 12. Se ha estudiado tanto el uso de fibras plásticas de polipropileno como de acero con diferentes contenidos de Kg/m<sup>3</sup> de hormigón.

Paralelamente a las características materiales, se han incluido en dicho estudio los casos del perfil 51 simple y doble. El perfil simple es de mayor interés, porque presenta un menor canto de barrera y en consecuencia una menor resistencia al impacto. Para el caso del perfil doble es interesante ver la incidencia en incrementar el grosor de la barrera para que se colapse respecto con el perfil simple.

Para finalizar, como resumen de los cálculos con el perfil 51 se presentan en la Tabla 6.9 los valores geométricos de cada caso y el número de subcasos de cada tipo de rotura. Para cada subcaso se debe añadir el cálculo de los diferentes materiales empleados (hormigón en masa, hormigón armado con 2 $\phi$ 12 y 3 $\phi$ 12, hormigón con fibras de acero (15, 25 y 35 Kg/m<sup>3</sup>) y con fibras plásticas (2, 4, 6, 8, 10 y 12 Kg/m<sup>3</sup>) y la forma del perfil sea simple o doble. En los casos 8 y 13, los valores de los parámetros geométricos  $a_R$  y  $a'$  se aplican conjuntamente con los pares

de valores siguientes:  $a_R = 1$  y  $a' = 0,5$ ;  $a_R = 1,5$  y  $a' = 1$ ;  $a_R = 2$  y  $a' = 1,5$ . Para el caso 15, cuando  $H = 0,2$  m, sólo se considera con un valor de  $h_R = 0,1$  m acorde con la forma de dicho caso.

Caso	H (m)		h <sub>R</sub> (m)		a <sub>R</sub> (m)			a' (m)			L <sub>f</sub> (m)			Subcasos	Material (x12)	Perfil (S/D)
1	0,2	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	24	48
2	0,2	0,5	-	-	0,5	1	1,5	-	-	-	-	-	-	6	72	144
3	0,2	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	24	48
4	0,5	0,5	0,1	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	24	48
5	0,5	0,5	0,1	0,2	0,5	1	1,5	-	-	-	-	-	-	6	72	144
6	0,2	0,5	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1	1,5	-	6	72	144
7	0,2	0,5	-	-	0,5	1	1,5	-	-	L <sub>f</sub> = a <sub>R</sub>			6	72	144	
8	0,2	0,5	-	-	1	1,5	2	0,5	1	1,5	L <sub>f</sub> = a'			6	72	144
9	0,2	0,5	-	-	1	1,5	2	-	-	0,5	1	1,5	-	6	72	144
10	0,2	0,5	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1	1,5	-	6	72	144
11	0,5	0,5	0,1	0,2	-	-	-	-	-	0,5	1	1,5	-	6	72	144
12	0,5	0,5	0,1	0,2	0,5	1	1,5	-	-	L <sub>f</sub> = a <sub>R</sub>			6	72	144	
13	0,5	0,5	0,1	0,2	1	1,5	2	0,5	1	1,5	L <sub>f</sub> = a'			6	72	144
14	0,5	0,5	0,1	0,2	0,5	1	1,5	-	-	L <sub>f</sub> = a <sub>R</sub>			6	72	144	
15	0,2	0,5	0,1	0,2	0,5	1	1,5	-	-	L <sub>f</sub> = a <sub>R</sub>			9	108	216	
Total de valores de carga rotura mínima													<b>81</b>	<b>972</b>	<b>1944</b>	
*Total de valores de carga calculados													<b>1377</b>	<b>16524</b>	<b>33048</b>	

\*Con un rango de valores de  $\alpha_R$  entre 5° - 85° (intervalos de 5°, se tiene un total de 17 valores de carga)

Tabla 6.9. Total de casos considerados para el cálculo a rotura con el perfil 51.

En la Tabla 6.9 se ve que el número total de valores de carga a calcular asciende a más de 33000 resultados, por tanto será importante realizar un esfuerzo de síntesis y resumen de los datos obtenidos. De estos 33000 valores de carga, se busca para cada subcaso el valor de carga más bajo de rotura, por lo que se reduce el rango de valores a analizar a 1944 resultados. De estos resultados se deberá tener en cuenta que la mitad son con el perfil simple y la otra mitad del doble. Para cada tipo de perfil se analizarán los resultados de cada subcaso según el material empelado. En el Anejo 7 se puede ver la nomenclatura de cada subcaso.

#### 6.4.2- Perfiles 122 y 123

El cálculo a rotura de los perfiles 122 y 123 se estudian de acuerdo con las características mecánicas de dichos perfiles. Para ambos perfiles, se analiza el modo de rotura más probable en la zona más débil de la barrera (zona del pre-corte), ya que representa una zona de discontinuidad de la barrera donde pueda romper. Por otro lado, para el perfil 122 se cree

conveniente el estudio a punzonamiento en la zona del plinto debido al perfil de porexpan que hay en el interior del perfil. En cambio, en el perfil 123 no es necesario el cálculo a punzonamiento, puesto que el perfil de porexpan de este perfil es una lámina de sólo 2 cm de grosor a nivel del suelo.

En base a las formas de rotura posibles para los perfiles 122 y 123, es de esperar que una línea de rotura aparezca en la zona de la junta debido al menor grosor del perfil en esta zona. Por tanto, de acuerdo con los modos de rotura propuestos en las tablas 6.8 y 6.9, en la Tabla 6.10 se muestran los casos 16-21 (perfil 122) y 24-29 (perfil 123) que corresponden a la misma forma de rotura de los casos 1, 4, 5, 6, 11 y 12 del perfil 51. Los casos 3 y 10 del perfil 51, con rotura en forma circular, no se han considerado debido a que el cálculo con líneas de rotura con cono de hundimiento no permite diferenciar la menor resistencia seccional del pre-corte.

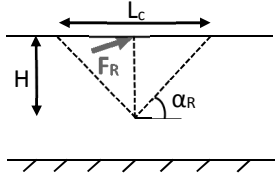
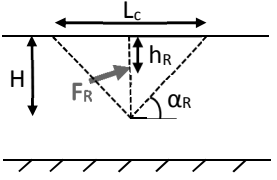
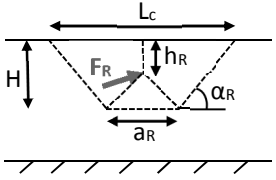
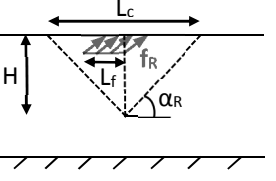
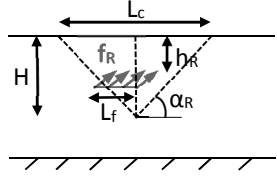
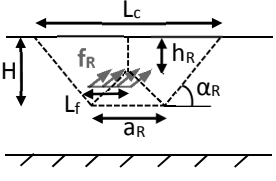
Carga puntual		
		
a) Caso 16/24. Rotura triangular.	b) Caso 17/25. Rotura triangular.	c) Caso 18/26. Rotura trapezoidal.
Carga lineal		
		
d) Caso 19/27. Rotura triangular.	e) Caso 20/28. Rotura triangular.	f) Caso 21/29. Rotura trapezoidal.

Tabla 6.10. Casos de rotura para los perfiles 122 y 123.

Adicionalmente, para estos dos perfiles se calculan dos modos de fallo nuevos respecto al perfil 51 teniendo en cuenta los pre-cortes. Se considera que en estos dos casos, la barrera cede formándose 3 líneas de rotura verticales coincidiendo con el trazado de los pre-cortes. En la Tabla 6.11 se muestra la forma de rotura propuesto y los casos considerados según el modo de carga aplicada.

En la citada Tabla 6.11.a se observa que el modo de fallo producido por el impacto sobre el pre-corte forma una línea de rotura interior con momentos positivos y otras dos líneas de rotura con momentos negativos. Además, se debe tener en cuenta la fuerza de rozamiento que actúa de modo opuesto al choque favoreciendo la resistencia de la barrera.

En los casos planteados de la misma tabla (Tabla 6.11 b y c) se diferencian según el modo de carga aplicado. Utilizando la teoría de las líneas de rotura con el método de los trabajos

virtuales se obtiene que para los casos 30 y 32 el trabajo realizado por una carga puntual actuando en el pre-corte es homólogo al de una carga lineal colocada verticalmente sobre el pre-corte. De modo análogo, sucede con los casos 31 y 33 que el trabajo realizado por una carga lineal con una determinada longitud longitudinal ( $L_f$ ) centrada en el pre-corte es homólogo al de una carga superficial centrada en el pre-corte con la misma longitud longitudinal ( $L_f$ ).

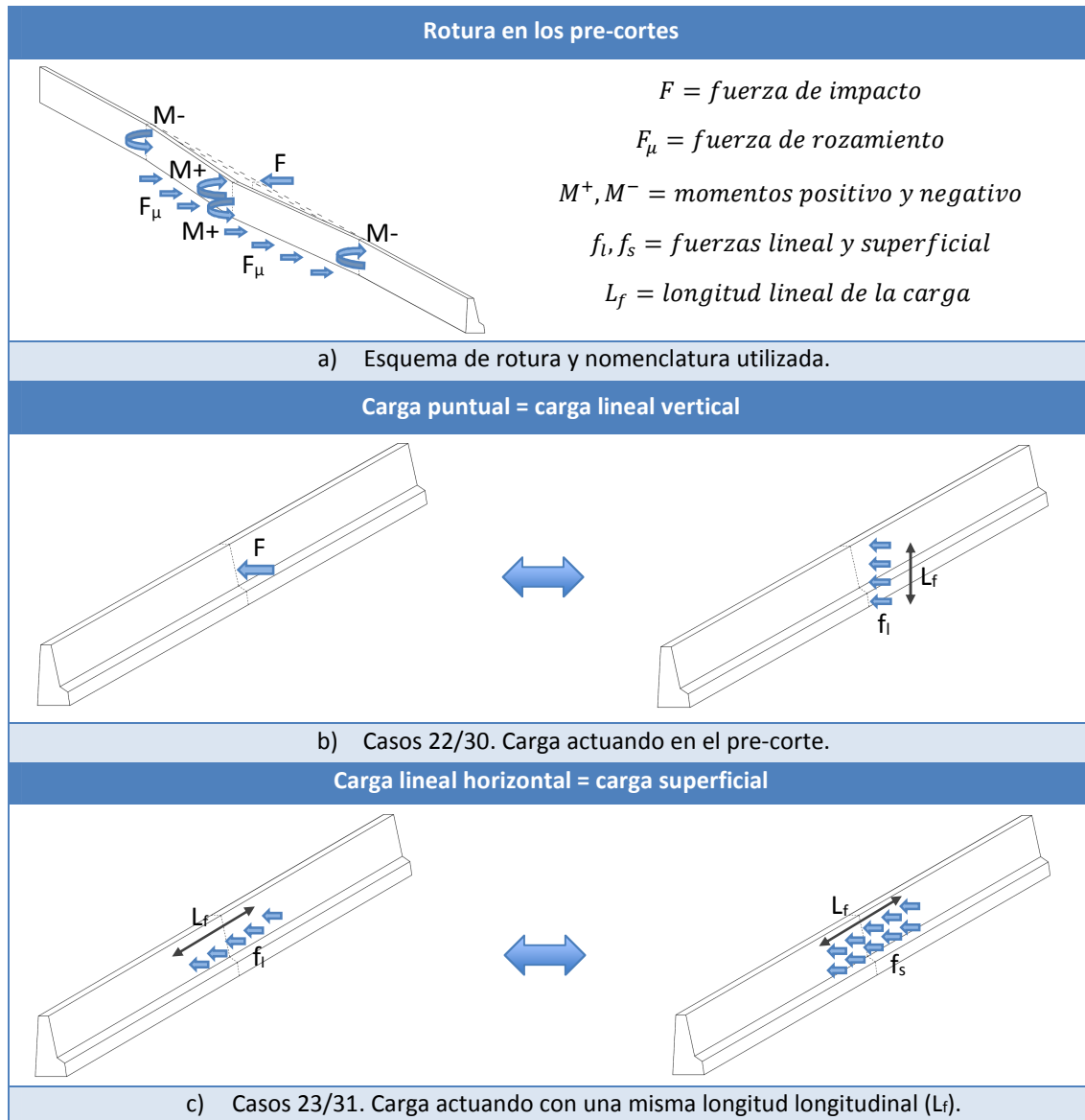


Tabla 6.11. Casos de rotura adicionales de los perfiles 122 y 123 respecto al perfil 51.

En la Tabla 6.12 se muestran los casos de rotura considerados y los subcasos debidos a las distintas medidas geométricas para ampliar el radio de estudio. En ella se puede ver el número del total de casos y valores de carga de rotura a calcular. Además, se tiene que tener en cuenta que sólo se analiza un solo tipo de material para cada perfil. Para el perfil 122 se emplea hormigón con fibras plásticas ( $2 \text{ Kg/m}^3$ ) y para el perfil 123 hormigón armado con  $3\phi 12$ .

Caso	H (m)		h <sub>R</sub> (m)		a <sub>R</sub> (m)			a' (m)	L <sub>f</sub> (m)			Subcasos	Perfil (S/D)
16/24	0,2	0,5	-		-			-	-			2	4
17/25	0,5		0,1	0,2	-			-	-			2	4
18/26	0,5		0,1	0,2	0,5	1	1,5	-	-			6	12
19/27	0,2	0,5	-		-			-	0,5	1	1,5	6	12
20/28	0,5		0,1	0,2	-			-	0,5	1	1,5	6	12
21/29	0,5		0,1	0,2	0,5	1	1,5	-	L <sub>f</sub> = a <sub>R</sub>			6	12
22/30	-		-		-			-	0,5	1	1,5	3	6
23/31	-		-		-			-	0,5	1	1,5	3	6
Total de valores de carga rotura mínima											<b>34</b>	<b>68</b>	
*Total de valores de carga calculados											<b>482</b>	<b>964</b>	

\*Con un rango de valores de  $\alpha_R$  entre 5° - 85° (intervalos de 5°, se tiene un total de 17 valores de carga), para los casos 22/30 y 23/31 solo tienen 1 valor de carga para cada subcaso.

Tabla 6.12. Total de casos considerados para el cálculo a rotura con los perfiles 122 y 123.

Se puede ver que el número total de subcasos considerados con la carga de rotura mínima es de 34, aumentando justo el doble para el análisis de perfil simple y doble. Si se contabiliza el total de valores calculados en función del rango de valores  $\alpha_R$  se alcanza un número total de 964 resultados para cada perfil. En el Anejo 7 se puede ver la nomenclatura de cada subcaso.

En referencia al cálculo a punzonamiento, es de interés estudiar qué grosor de hormigón es el necesario para evitar la rotura por el impacto de un vehículo. En todos los ensayos de impacto de esta tesis se ha observado que se produce un impacto de la rueda izquierda delantera del vehículo en el plinto del perfil, por lo que puede ser susceptible de rotura si el espesor de hormigón no es suficiente. Este cálculo se realiza de acuerdo al Artículo 46 de la EHE 08, mostrándose en las ecuaciones 6.1-4, la formulación utilizada

$$\tau_{sd} \leq \tau_{rd} \quad [\text{Ec. 6.1}]$$

$$\tau_{sd} = \frac{F}{u \cdot d_h} \quad [\text{Ec. 6.2}]$$

$$\tau_{rd} = \frac{0,075}{\gamma_c} \cdot \xi^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad [\text{Ec. 6.3}]$$

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_h}} \leq 2,0 \quad [\text{Ec. 6.4}]$$

La ecuación 6.1 establece la condición que la tensión tangencial resistente del hormigón ( $\tau_{rd}$ ) sea mayor o igual a la tensión tangencial de cálculo ( $\tau_{sd}$ ) para que no se produzca punzonamiento. La  $\tau_{rd}$  (Ec. 6.3) depende exclusivamente de las características del material y del espesor. La  $\tau_{sd}$  (Ec. 6.2) viene dada en función de la fuerza de impacto (F) en N, del canto ( $d_h$ )

en mm y del perímetro crítico ( $u$ ) en mm. El perímetro crítico se determina en función del modo de aplicación de la carga y del canto útil. En seguida, en la Figura 6.3 se muestra la zona de impacto del perfil, la esquematización de la rotura por punzonamiento (a) y la manera en cómo se calcula el perímetro crítico (b).

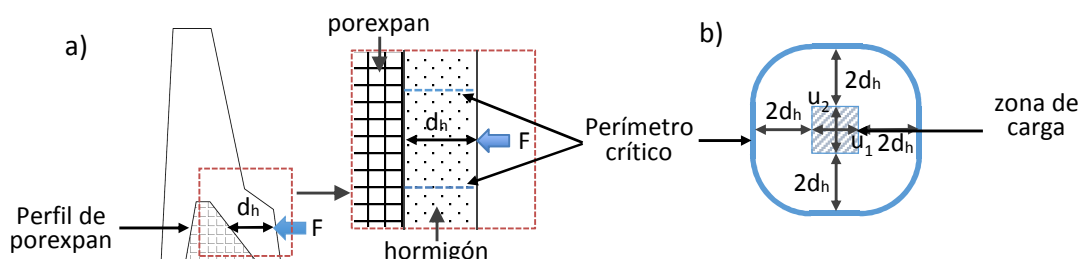


Figura 6.3. Rotura por punzonamiento en el plinto (a) y cálculo del perímetro crítico (b).

Como se puede ver, el perímetro crítico se adapta a la forma aplicada de la carga. Las medidas del perímetro vienen dadas por las dimensiones de la superficie de aplicación de la carga y del canto útil. Para el caso que ocupa con el perfil 122, se supone que la carga puntual actúa en una superficie cuadrada muy pequeña de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ . El canto útil se coge como el espesor de hormigón del plinto.

## 6.5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el análisis de los resultados más importantes de los perfiles 51, 122 y 123, mostrando los valores de carga más bajos para que se produzca rotura para cada caso estudiado. Para cada los resultados se agrupan según el tipo y modo de carga de impacto. El orden de análisis será siempre el mismo, empezando por una carga puntual en coronación, siguiendo con una carga puntual por debajo de la coronación, una carga lineal en coronación y finalizando con una carga lineal por debajo de la coronación. Adicionalmente se incorpora en los resultados el valor de impacto del autocar (ensayo TB51) para comprobar la resistencia de la barrera a vehículos más pesados que el vehículo ligero del ensayo TB11. En el Anejo 8 se muestra la totalidad de los resultados obtenidos, además de las expresiones y forma de cálculo de cada caso.

El análisis de resultados de cada tipo de carga seguirá un patrón común, examinando cuáles son las principales características que se aprecien y de los objetivos marcados para este capítulo. A continuación se muestra el orden de estudio seguido:

- 1º. Identificar el caso con carga de rotura más bajo y la tendencia de los demás subcasos.
- 2º. Analizar el desarrollo de los valores de carga en función de las principales variables geométricas.
- 3º. Determinar el factor de seguridad del perfil frente al impacto del vehículo (TB11).

- 4º. Comportamiento de los distintos materiales empleados, en especial énfasis en la posibilidad de sustitución de las barras de acero convencionales (2φ12) por fibras.
- 5º. Ver la incidencia de la resistencia según el grosor de la barrera mediante el estudio entre el perfil simple y doble.

Al finalizar el estudio de cada perfil, se muestra en una tabla resumen de los resultados analizados para concluir cuáles han sido las principales ideas a remarcar.

### 6.5.1- Perfil 51

Acto seguido, se presentan los resultados obtenidos con el perfil 51, mostrando el siguiente orden según el tipo de carga aplicada: carga puntual en coronación, carga puntual por debajo de la coronación, carga lineal en la coronación y carga lineal por debajo de la coronación.

#### Carga puntual en coronación

En primer lugar, se analizan los resultados obtenidos con una carga puntual en coronación. En la Tabla 6.13 se presentan 4 gráficas según si es un perfil simple o doble. Para cada tipología de perfil se distingue la forma de rotura con una altura de rotura desde la coronación de 0,2 m o 0,5 m (parámetro geométrico H).

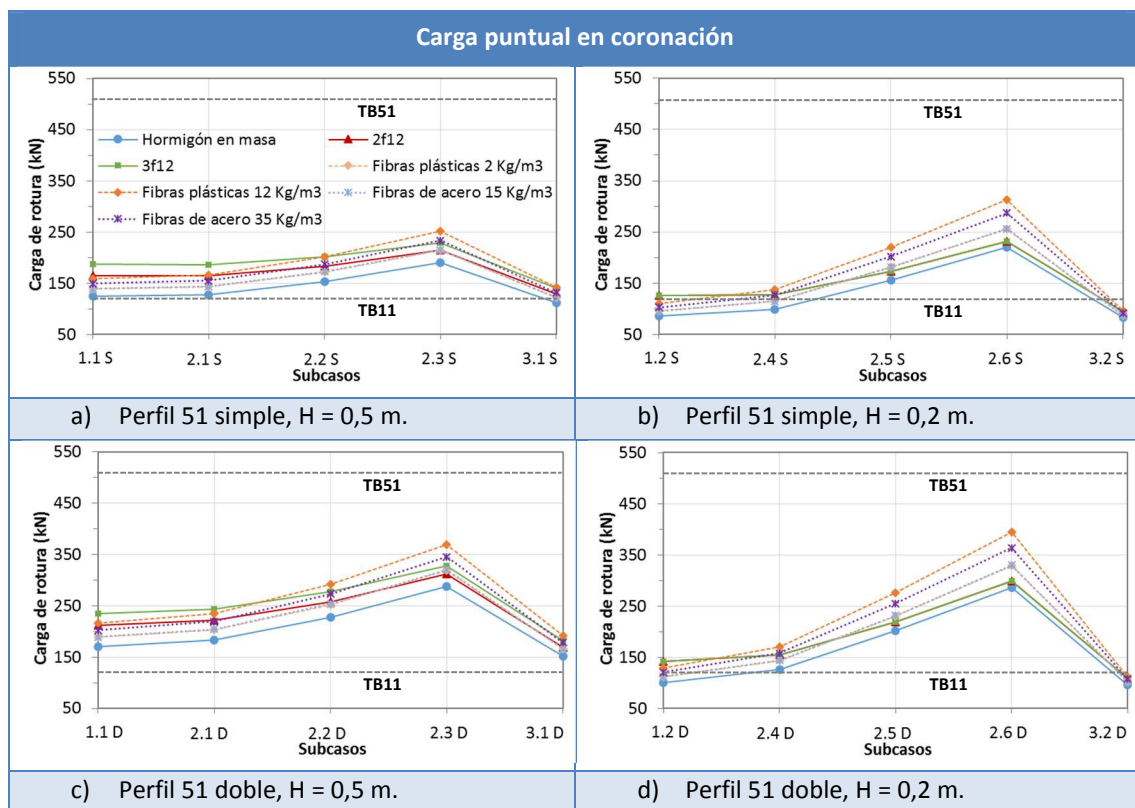


Tabla 6.13. Resultados de los casos de rotura 1, 2 y 3 del perfil 51.



De forma general, observando los resultados de las 4 gráficas de la Tabla 6.13, se desprende que los subcasos del caso 3 son los que obtienen los valores de rotura más bajos. Respecto a los valores de los subcasos 3, los subcasos 1 registran valores de rotura entre el 5 (4) y el 30 (33) % superiores; y en los subcasos 2 se incrementan aún más las diferencias desde un 15 % hasta alcanzar un 250 (251) %. Esta disparidad de resultados de los subcasos 2 se deben a la forma trapezoidal de rotura a partir de valores de  $a_R \geq 1$  m (subcasos 2.2 - 2.6). Entre los resultados con formas de rotura con  $H = 0,5$  y  $0,2$  m, se producen valores más bajos con  $H = 0,2$  m, excepto en los subcasos de 2 con  $a_R \geq 1$  m.

Si se comparan estos valores de rotura con la carga de impacto del coche (ensayo TB11, con un valor de impacto de 119 kN) parte de los subcasos 1 y 3 con  $H = 0,2$  m no resisten a dicho choque. En cambio, con  $H = 0,5$  m en la mayoría de los subcasos sí que resisten. Para el impacto del autocar (ensayo TB51, con un valor de impacto de 510 kN) se desprende que cualquier de los subcasos planteados la barrera cede.

Analizando el comportamiento de los materiales empleados se ve que el hormigón en masa es el que obtienen valores de carga más pequeños. Si se implementan las barras de acero longitudinales, se obtienen aumentos respecto al hormigón en masa entre un 9 y un 32 % para  $2\phi 12$  y entre un 14 y un 50 % para  $3\phi 12$  con  $H = 0,5$  m. Para roturas con  $H = 0,2$  m, se tienen aumentos del 4 al 47 % tanto con 2 o 3 barras de acero. El hecho de llevar 2 o 3 barras no varían su resistencia, ya que sólo actúa la barra situada a 15 cm por debajo de la coronación. Por tanto, la introducción de barras longitudinales de acero pueden incidir notablemente o no su resistencia dependiendo del tipo de rotura que se produzca. Es notorio ver que para los subcasos 3, su influencia es la menor de todos los demás subcasos 1 y 2.

En referencia a la incorporación de fibras en el hormigón, se aprecia un intervalo variable de resistencias posibilitando la sustitución de las barras de acero en gran parte de los casos planteados. La incidencia de las fibras es mayor para los subcasos considerados del caso 2, donde la contribución del momento positivo es mayor llegando a valores superiores de hasta un 31 % respecto a  $2\phi 12$  (2.6 S) con un contenido de fibras plásticas de  $12 \text{ Kg/m}^3$ .

Para finalizar, examinando los resultados obtenidos entre el perfil simple y el doble, se registran aumentos significativos de resistencia con el perfil doble. Con  $H = 0,5$  m se producen incrementos entre el 26 y el 51 %, y con  $H = 0,2$  m se elevan entre el 13 y el 30 %. Esta diferencia entre estos dos parámetros se debe a la influencia del espesor del perfil según la altura de rotura propuesta.

#### Carga puntual por debajo de la coronación

En la Tabla 6.14 se presentan los resultados con una carga puntual por debajo de la coronación mediante 4 gráficas según si es un perfil simple o doble. Para cada tipología de perfil se distingue la forma de rotura con una altura de aplicación de  $0,1$  y  $0,2$  m (parámetro geométrico  $h_R$ ).

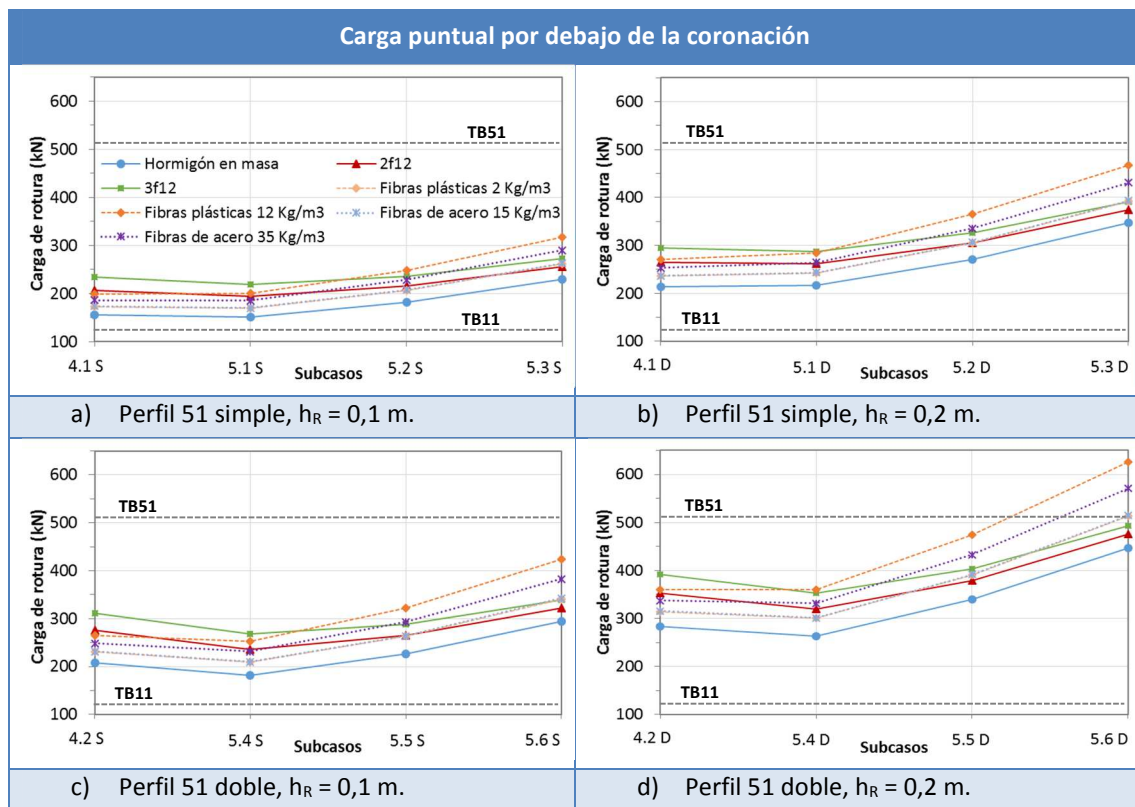


Tabla 6.14. Resultados de los casos de rotura 4 y 5 del perfil 51.

Analizando los resultados de los casos 4 y 5 planteados, se aprecia que los subcasos 4.1 y 5.1 ( $h_R = 0,1$  m) y los subcasos 5.4 (con  $h_R = 0,2$  m) son los que obtienen los valores de rotura más bajos. Los otros subcasos 5 (con formas de rotura de  $a_R \geq 1$  m) registran valores claramente superiores con incrementos de hasta el 74 % respecto del subcaso con el valor de carga mínimo.

Entre los resultados con formas de rotura según el parámetro  $h_R$ , se producen disminuciones en los valores de rotura del orden de un 20 % con  $h_R = 0,1$  m respecto del  $h_R = 0,2$  m. Este hecho se debe a que la carga de impacto se encuentra más cercana a la coronación actuando perpendicularmente sobre la barrera con un menor espesor del perfil.

Respecto a los valores de choque de diseño del vehículo ligero y del autocar se observa que en todos los subcasos, la barrera resiste el impacto del automóvil pero no el del autocar (excepto el subcaso 5.6 D con fibras). Los factores de seguridad en el caso del coche son superiores al 1,3.

Si se examinan los resultados obtenidos de los distintos materiales utilizados se ve el mismo comportamiento, donde la influencia de las barras de acero disminuyen a medida que el modo de rotura con el parámetro geométrico  $a$  aumenta. En cambio el hormigón con fibras tiene una mayor repercusión al favorecer la resistencia de la barrera, ya que las fibras actúan en cualquier dirección de los momentos positivos presentes en las líneas de rotura interiores.

Para los subcasos con los valores de carga mínimo (4.1, 5.1 y 5.4) se registran resistencias con  $2\phi 12$  un 20 - 30 % superiores al hormigón en masa, mientras que si usan  $3\phi 12$  se alcanzan hasta un 50 % mayor. La sustitución de las 2 barras de acero por fibras es posible en la mayoría de los subcasos, no así, si se consideran las 3 barras. El hormigón fibras tiene una importante relevancia para los subcasos 5.2, 5.3, 5.5 y 5.6, e incluso para los subcasos 5.6 se observan que los contenidos mínimos de fibras estudiados obtienen cargas mayores que los  $2\phi 12$ .

Para concluir si se comparan los resultados obtenidos entre el perfil simple y el doble, se registran aumentos significativos de resistencia con el perfil doble. De manera conjunta, tanto con  $h_R = 0,1$  m y como  $h_R = 0,2$  m, se producen incrementos entre el 26 y el 52 %.

#### Carga lineal en coronación

En las Tablas 6.15 y 6.16 se presentan los resultados con una carga lineal en coronación ya sea con el perfil 51 simple o doble. Para cada tipología de perfil se distingue la forma de rotura según la longitud de la carga lineal ( $L_f$ ) y de la altura de rotura de la barrera ( $H$ ).

Evaluando los resultados de carga de rotura de las Tablas 6.15 y 6.16 se observa que los subcasos 10 son los que obtienen claramente los valores más bajos. Los subcasos 6 (con  $H = 0,5$  m) y 7 (con  $H = 0,2$  m) son los siguientes con menores cargas registradas, pero todos ellos superiores al 23 % del correspondiente subcaso 10. En el otro extremo, los subcasos 9 son los que tienen los resultados más elevados con diferencias con el valor de carga de mínima de hasta 3,5 veces superior.

También se aprecia que a medida que se aumenta la longitud de la carga lineal, mayor es la carga necesaria para producirse la rotura. Cada incremento de 0,5 m de longitud de carga, se aumenta entorno un 10 - 30 % con  $H = 0,5$  m y entorno un 30 - 50 % con  $H = 0,2$  m el valor de rotura necesaria. Esto se explica por la mayor distribución de la carga sobre la barrera, donde la fuerza se reparte más.

Otro factor importante es la comparación entre las gráficas con  $H = 0,5$  y  $0,2$  m; en el cual es de esperar que las alturas de fallo de  $0,2$  m registren valores más bajos que los de  $0,5$  m, tal y como sucede en los subcasos 10. Pero este comportamiento no se cumple de la misma manera en los demás subcasos. Los subcasos 6 y 9 tienen una tendencia opuesta que se intensifica cuánto mayor es la longitud de la carga lineal.

En referencia a los choques con vehículo ligero y autocar, en casi la totalidad de todos los subcasos resiste el impacto del coche y no aguanta para el autocar. Las 2 excepciones que se salen de esta regla, son el subcaso 10.1 S y el subcaso 9.6 D. En el subcaso 10.1 S se dan choques muy próximos al valor de impacto de diseño del automóvil (119 kN) con factores de seguridad entre 0,8 y 1,0 según el material empleado. En cambio, el subcaso 9.6 D (y el 9.6 S con fibras) es el único que obtiene resultados superiores al impacto de un autobús con factores de seguridad entre 1,1 y 1,4.

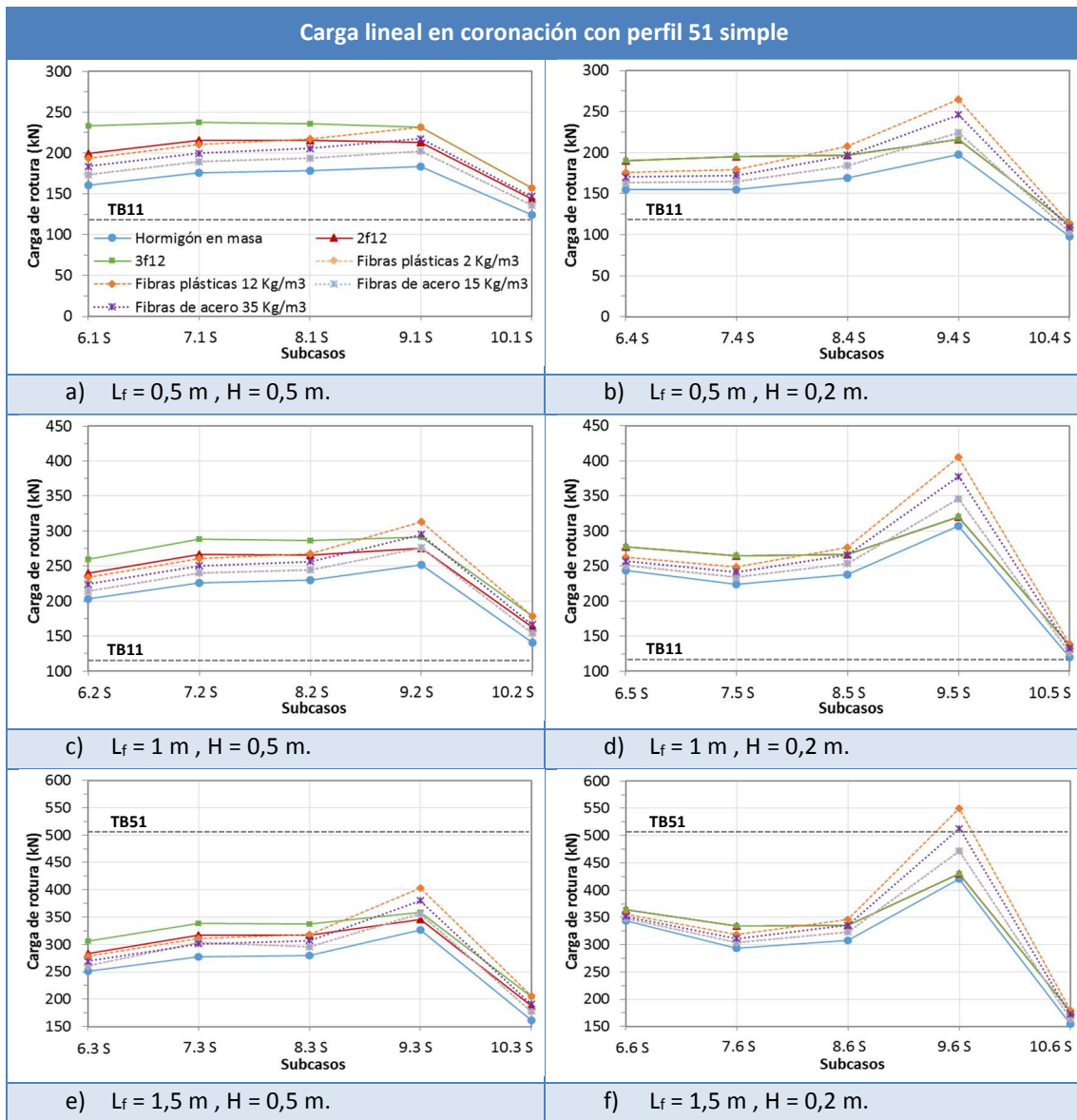


Tabla 6.15. Resultados de los casos de rotura 6, 7, 8, 9 y 10 perfil 51 simple.

Entrando a evaluar los materiales usados, se ve que los resultados de los subcasos 6, 7 e incluso 8, la introducción de 2 o 3 barras de acero dan los valores más elevados (incrementos entre un 6 y un 46 % respecto al hormigón en masa); sólo en algunos subcasos con contenidos muy altos de fibras consiguen alcanzarlos. En cambio, los subcasos 9 y 10 sí que es posible su sustitución. En los subcasos 10, la adición en el hormigón entre 3,5 – 10,4 Kg/m<sup>3</sup> de fibras plásticas permiten sustituir los 2φ12.

Concluyendo con los resultados de las tablas 6.16 y 6.17, en los datos del perfil simple y doble, se aprecian incrementos significativos de resistencia y se registran aumentos significativos de resistencia con el perfil doble. Para formas de rotura con  $H = 0,2$  se producen valores superiores entre el 15 y el 30 %; y para  $H = 0,5$  se alcanzan entre el 21 y el 52 %. Este hecho se debe al mayor espesor del perfil para una rotura más profunda.

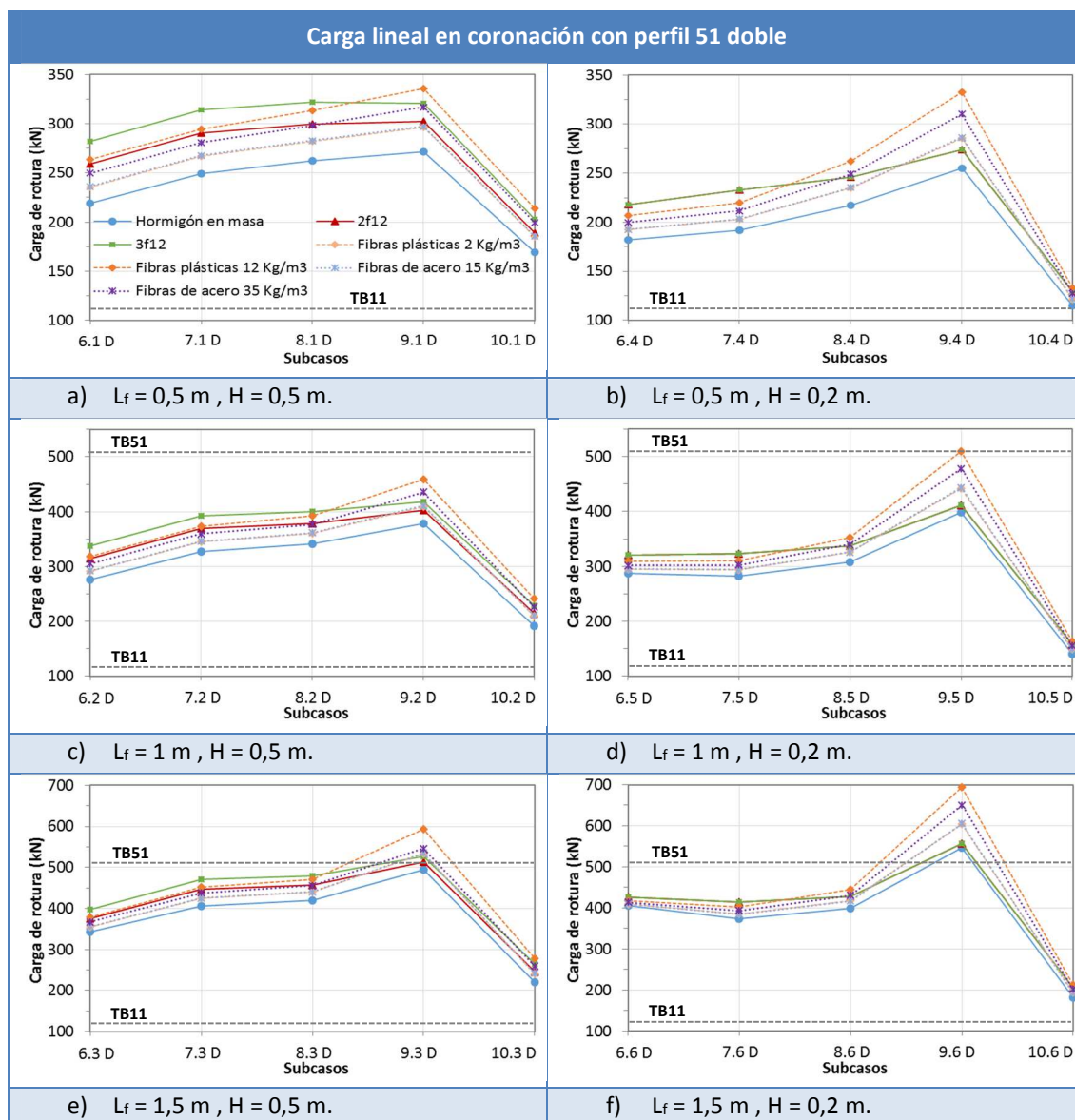


Tabla 6.16. Resultados de los casos de rotura 6, 7, 8, 9 y 10 perfil 51 doble.

### Carga lineal por debajo de la coronación

Para finalizar el análisis de impacto con el perfil 51 se muestran en las Tablas 6.17 y 6.18 los resultados obtenidos con una carga lineal por debajo de la coronación según corresponda al perfil simple o doble. Además, en cada tabla se distingue la forma de rotura según la longitud de la carga lineal ( $L_f$ ) y de la altura de aplicación por debajo de la coronación ( $h_R$ ).

En las citadas Tablas 6.17 y 6.18 se observa que según la longitud de carga lineal y la altura de aplicación la forma de rotura es de un caso u otro. Fijándose en una longitud de carga lineal de 0,5 m se aprecia que los subcasos 12 son los que obtienen los valores de rotura más bajos. Para alturas de aplicación de 0,2 m con  $L_f = 1$  y 1,5 m, son los subcasos 13 con valores mínimos dejando de lado los resultados de las fibras. Finalmente, para las cargas lineales de 1 y

1,5 m con  $h_R = 0,1$  m, se tiene que los subcasos 11 con perfil doble registran las cargas más pequeñas; mientras que los subcasos 12.2 S y 13.3 S lo son con perfil simple (sin tener en cuenta las fibras).

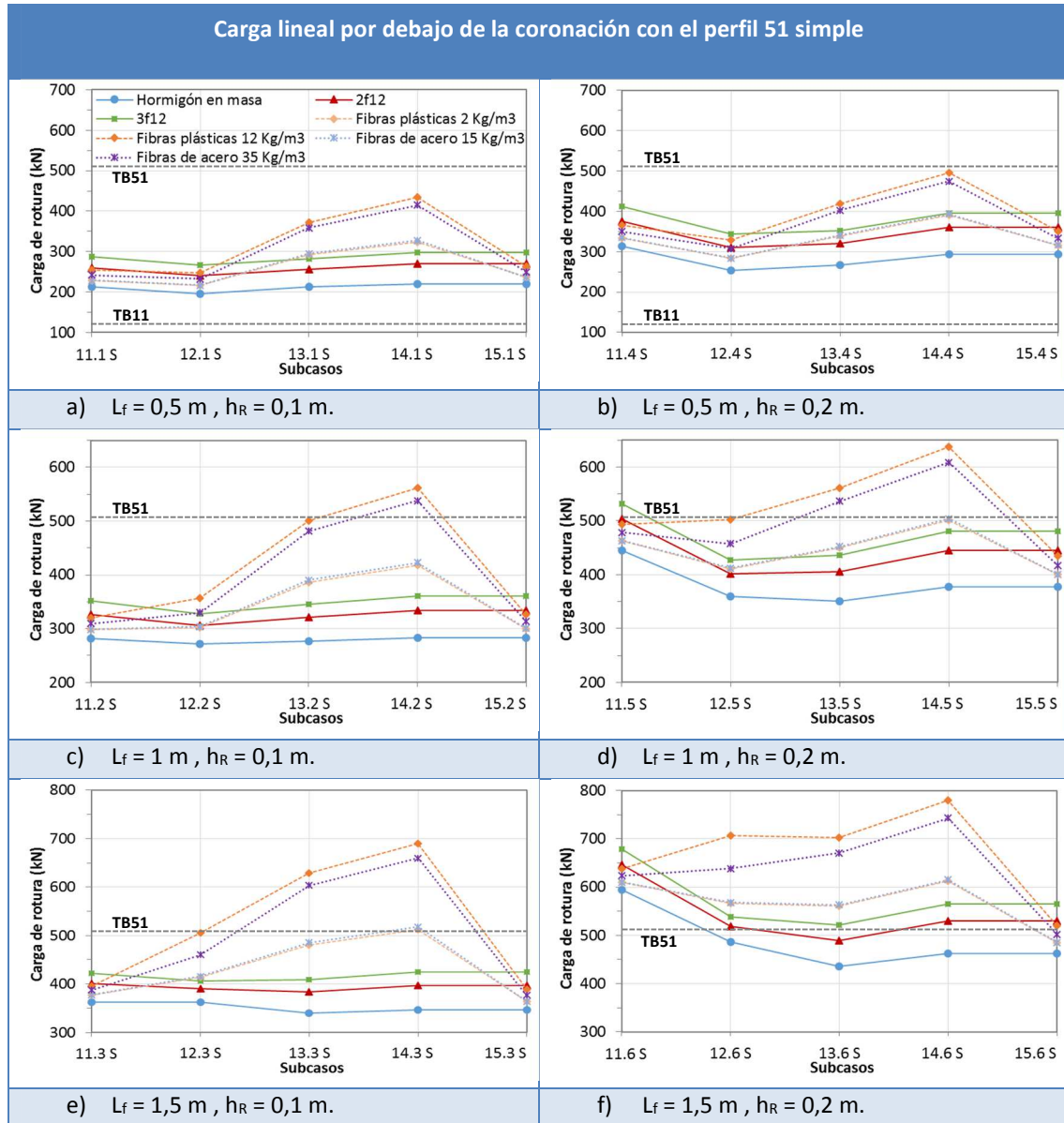


Tabla 6.17. Resultados de los casos de rotura 11, 12, 13, 14 y 15 del perfil 51 simple.

De modo análogo a los resultados de la carga lineal en coronación, se ve que a medida que se aumenta la longitud lineal de carga, mayor es el valor de choque para romper la barrera. De manera general, cada vez que se aumenta 0,5 m su longitud, se aumenta el valor de la carga entorno al 30 % según el subcaso.

Respecto a las cargas de impacto del coche y del autobús, se contempla que en la totalidad de los subcasos resiste el choque del vehículo, pero no así con el autocar. Los factores de seguridad en el caso del automóvil se sitúan todos ellos por encima de 1,6. Por lo que hace

el autocar, solo resiste con el perfil simple cuando la carga es de una longitud 1,5 m y aplicada a 0,2 m debajo de la coronación. En cambio, cuando el perfil es doble aguanta para los casos con longitudes de carga de 1 y 1,5 con alturas de aplicación de 0,2 m; y de sólo 1,5 m para alturas de 0,1 m.

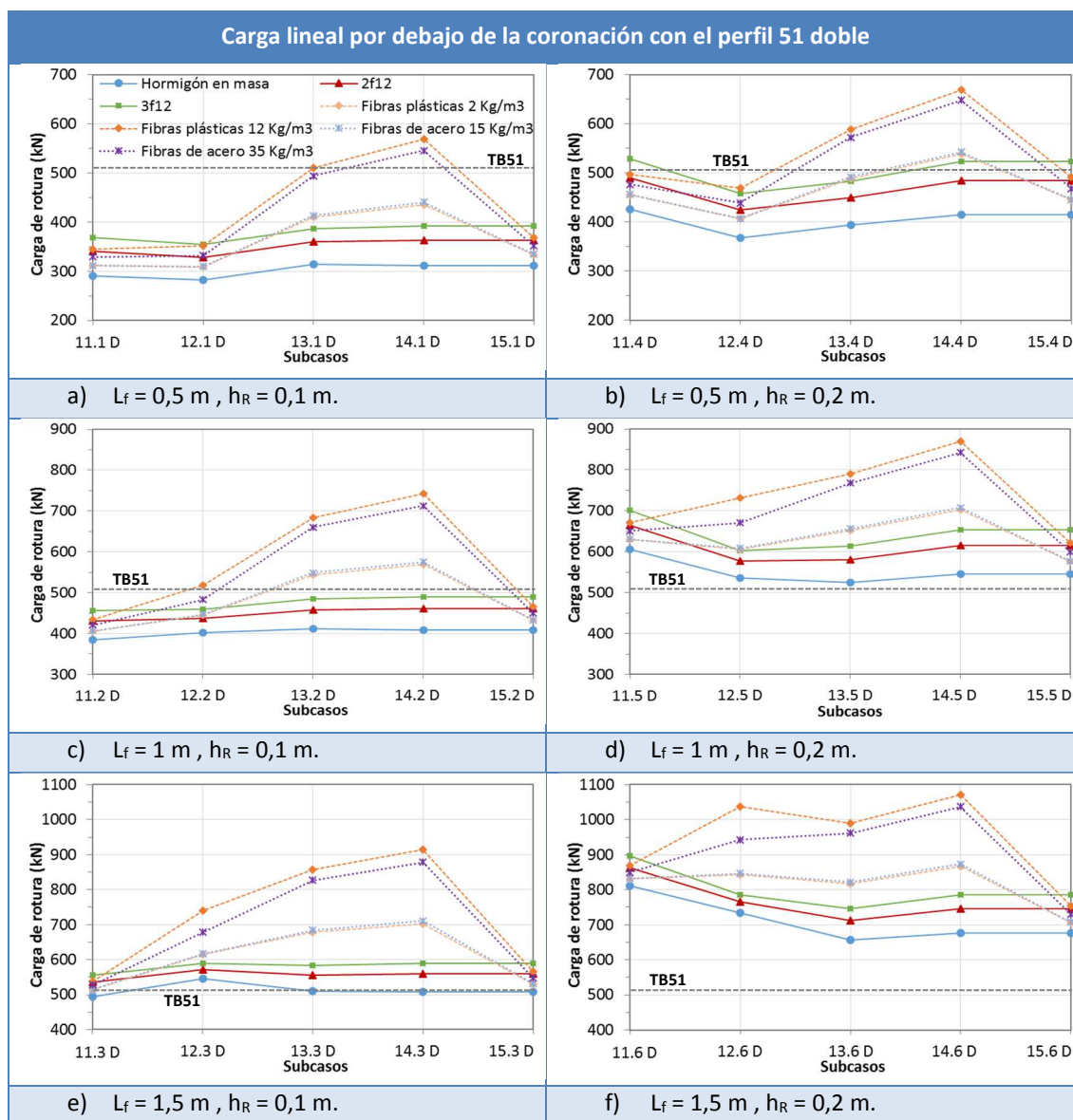


Tabla 6.18. Resultados de los casos de rotura 11, 12, 13, 14 y 15 del perfil 51 doble.

Analizando el comportamiento de los distintos materiales utilizados, se ve que de forma regular al introducir 2 o 3 barras de acero implican aumentos con rangos entre 4 – 23 % ( $2\phi 12$ ) y 7 – 36 % ( $3\phi 12$ ) respecto al hormigón en masa. El tanto por 100 de estos dos intervalos disminuye a medida que se aumenta la longitud de la carga lineal. Por tanto, la influencia de las barras de acero longitudinales disminuye cuando la aplicación del choque es más alargado. Esta pauta se produce porque las líneas de rotura son más horizontales donde el armado longitudinal trabaja con menos eficiencia.

En cambio, la introducción de fibras al hormigón sí que actúan indistintamente de la inclinación de las líneas de rotura presentes. En los subcasos 12, 13 y 14 se aprecian que las fibras generan importantes resistencias, pudiéndose sustituir incluso los 3 $\phi$ 12 sobradamente según el subcaso. En cambio para los subcasos 11 y 15 la sustitución de las fibras por las barras de acero longitudinales no es posible o salvo a contenidos altos cuando el perfil sea doble.

Para concluir, si se comparan los resultados entre el perfil simple y doble (tablas 6.17 y 6.18), se percibe el aumento notorio del mayor espesor del perfil doble. De manera conjunta con alturas de aplicación de 0,1 y 0,2 m se dan valores superiores respecto al perfil simple entre el 30 y el 50 % según la forma de rotura considerada.

### Resumen de resultados

Para concluir con el análisis del perfil 51, en la Tabla 6.19 se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos. En ella, se muestran los casos que han tenido la carga de rotura más baja según el tipo y modo de carga. Además, para el caso con rotura mínima se expone si resiste a los impactos de diseño del coche (ensayo TB11) y del autocar (TB51) y de la posibilidad de sustitución de las 2 barras de acero longitudinales por fibras.

Carga	Aplicación	Medidas de la carga (m)			Subcasos	Resistencia		2 $\phi$ 12 por fibras	
						TB11	TB51		
Puntual	Coronación	-			3.2	No	No	Sí	
Puntual	Debajo de la coronación	$h_R$	0,1		4.1/5.1	Sí	No	Sí	
			0,2		5.4				
Lineal	Coronación	$L_f$	0,5		10.4	Sí	No	Sí	
			1		10.5				
			1,5		10.6				
Lineal	Debajo de la coronación	$h_R$	0,1	$L_f$	0,5	12.1	Sí	No	Sí
					1	*12.2S/11.2D		No	
					1,5	*13.3S/11.3D		**No	
		0,2	$L_f$	0,5	12.4	No			
				1	*13.5	**No			
				1,5	*13.6	Sí			

\*Sin tener en cuenta las fibras. \*\*Excepto en los subcasos con perfil doble.

Tabla 6.19. Resumen de resultados del perfil 51.

En la Tabla 6.19 se ve que los casos de rotura más posibles de producirse son los que tienen forma de mordisco. Para cargas en coronación aparecen roturas con forma circular,



mientras que para cargas aplicadas por debajo de la coronación surgen roturas con forma trapezoidal. De esta manera se cumple con lo observado en casos reales de impacto (ver Tabla 6.3) donde los casos de rotura con carga más baja se asimilan a las formas reales.

Respecto a la resistencia de la barrera, todos los casos menos la carga puntual en coronación resiste el choque del coche (ensayo TB11), mientras que para el autobús (ensayo TB51) resiste para impactos con carga lineal de 1,5 m y aplicada a 0,2 m debajo de la coronación, más próxima a la realidad (subcaso 13.6).

### 6.5.2- Perfil 122

En seguida se presentan los resultados obtenidos con el perfil 122 mostrando el siguiente orden según el tipo de carga aplicada: carga puntual en coronación, carga puntual por debajo de la coronación, carga lineal en la coronación y carga lineal por debajo de la coronación. Luego, se enseñan los datos de los dos casos de rotura (casos 22 y 23) y para finalizar los cálculos a punzonamiento.

#### Carga puntual en coronación

En la Figura 6.4 se presentan los resultados obtenidos con el caso 16 referente a la aplicación de una carga puntual en coronación. En ella, se ve que para cada subcaso (16.1 con  $H = 0,5$  m y 16.2 con  $H = 0,2$  m) se representa el valor de la carga de rotura del perfil simple y su aumento de resistencia debido al perfil doble.

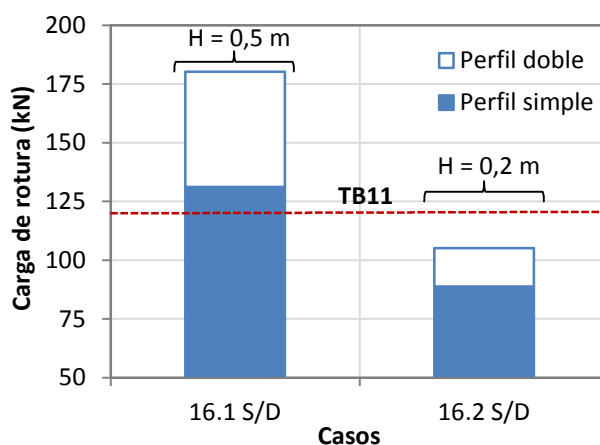


Figura 6.4. Resultados caso 16.

Observando los valores de rotura entre los 2 subcasos, se aprecia que el subcaso con una altura de rotura menor (16.2) es el que obtienen la carga de fallo más baja. La diferencia entre los 2 perfiles simples es de un 49 % respecto del valor más bajo y entre perfiles dobles llega a ser de un 72 %. Esta cierta diferencia entre perfil simple/doble se aprecia en los incrementos desiguales según el subcaso, para el 16.1 se aumenta un 37 % respecto del perfil

simple, mientras que para el 16.2 se incrementa un 18 %. Este comportamiento se debe a la mayor influencia en el grosor del perfil con una altura de rotura mayor ( $H$ ) del 16.1 frente a 16.2.

Si se comparan estos valores de rotura con las cargas de impacto del autocar (ensayo TB51), se desprende que en ningún caso resiste el choque de un autocar con factores de seguridad entre 0,2 y 0,4. Respecto al impacto del automóvil (TB11), solamente el subcaso 16.2, registra factores de seguridad menores de 1 (de 0,7 a 0,9); en contraposición del subcaso 16.1 con factores de seguridad superiores al 1,1.

#### Carga puntual por debajo de la coronación

En la Figura 6.5 se presentan los resultados obtenidos con los subcasos planteados a partir de los casos 17 y 18. Los subcasos con subíndices 1 – 3 corresponden a una altura de aplicación de la carga de  $h_R = 0,1$  m; y para los subíndices 5 – 6 son para alturas de  $h_R = 0,2$  m. Además se presentan los incrementos producidos por el perfil doble.

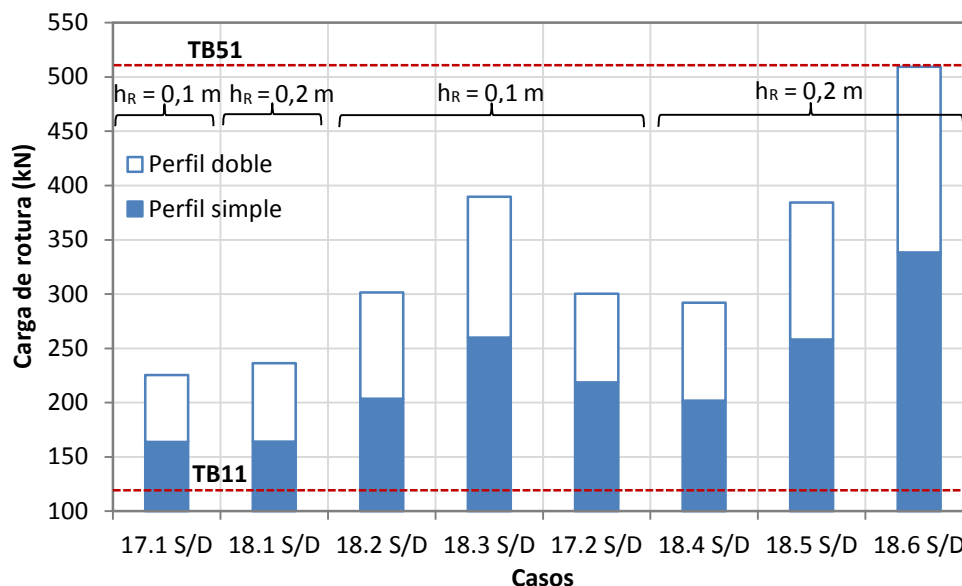


Figura 6.5. Resultados de los subcasos 17 y 18.

Analizando los resultados con  $h_R = 0,1$  m, se aprecia que los subcasos 17.1 y 18.1 obtienen los valores de rotura más bajos (carga de 164 kN para ambos). Respecto a los resultados con  $h_R = 0,2$  m, el subcaso 18.4 es el que obtiene la carga de rotura mínima seguido del subcaso 17.2. Para los subcasos 18, a medida que se aumenta el parámetro geométrico  $a_r$ , se producen incrementos de rotura entre el 25 %. Fijándose los datos de los perfiles dobles, todos ellos son entre un 40 y un 50 % superior al perfil simple.

En referencia a los valores de choque de diseño del vehículo ligero (TB11) y del autocar (TB51) se observa que en todos los subcasos, la barrera resiste el impacto del automóvil pero no el del autocar (excepto el subcaso 5.6 D con fibras). Los factores de seguridad en el caso del coche son holgados con valores superiores al 1,4.

### Carga lineal en coronación

En la Figura 6.6 se presenta los resultados con una carga lineal en coronación ya sea con el perfil 51 simple o doble. Para cada subcaso se distingue la forma de rotura según la longitud de la carga lineal ( $L_r = 0,5, 1$  y  $1,5$ ) y de la altura de rotura de la barrera ( $H = 0,5$  y  $0,2$  m).

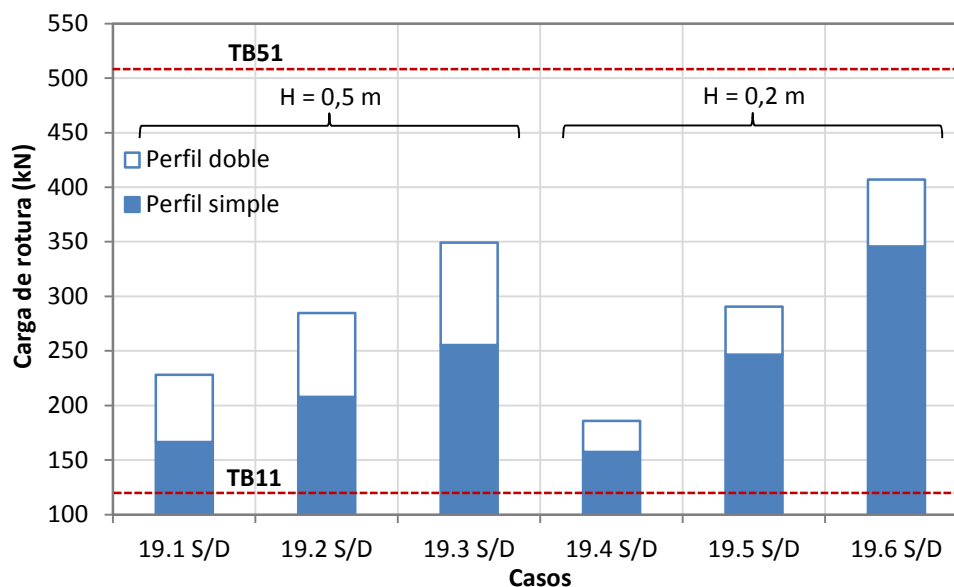


Figura 6.6. Resultados de los subcasos 19.

Evaluando los resultados de carga de rotura se desprende que los subcasos 19.1 y 19.4 son los que tienen los que obtienen menores valores. Este hecho es lógico, ya que para estos subcasos la carga lineal es más concentrada con una longitud lineal de 0,5 m. Si se aumenta esta longitud de aplicación de 0,5 m a 1 m y de 1 m a 1,5 m, la carga se incrementa del orden de un 25 % para  $H = 0,5$  m y del orden de un 50 % para  $H = 0,2$  m. Este desarrollo dispar entre ambas alturas de rotura se traduce en que a partir de una longitud de carga de 1 m, los subcasos con  $H = 0,5$  m obtienen valores más bajos.

Por lo que se refiere a los resultados entre perfil simple y doble se tienen dos comportamientos diferentes. Mientras que para los subcasos con  $H = 0,5$  se alcanzan subidas cerca de un 40 %; los subcasos con  $H = 0,2$  m se sitúan a la mitad.

Si se examina la resistencia del choque de un coche (TB11) se ve que en todos los subcasos la barrera no cede, con factores de seguridad por encima del 1,3. Por el otro lado, el impacto del autobús (TB51) implica el fallo de la estructura con factores de seguridad por debajo del 0,8.

### Carga lineal por debajo de la coronación

Para este caso, se presenta en la Figura 6.7 los resultados obtenidos con una carga lineal por debajo de la coronación según corresponda al perfil simple o doble. Además, para cada

subcaso se distingue la forma de rotura según la longitud de la carga lineal ( $L_f$ ) y de la altura de aplicación por debajo de la coronación ( $h_R$ ).

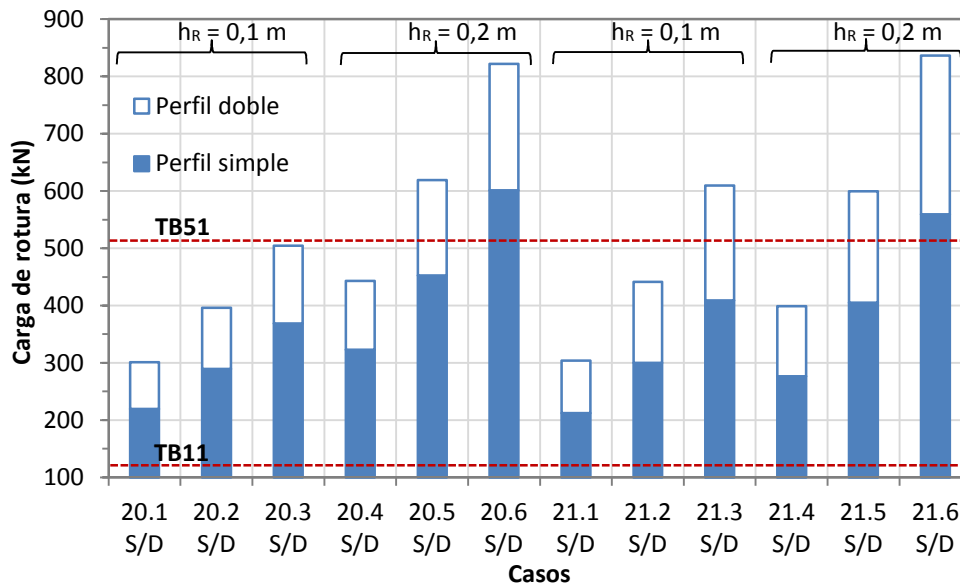


Figura 6.7. resultados de los casos 20 y 21.

Se observa que tanto para los subcasos con  $h_R = 0,1$  m como los de  $h_R = 0,2$  m no se aprecian diferencias significativas entre los subcasos 20 y 21 con la misma longitud de carga lineal ( $L_f$ ). En los subcasos donde existe una mayor desigualdad, el subcaso 20.3 S/D es entre un 10 y 17 % inferior al subcaso 21.3 S/D. Por tanto, como norma general se extrae que los casos de rotura 20 y 21 se pueden dar indistintamente. Si se examina con más detalle, para  $h_R = 0,1$  m, los subcasos 20 son ligeramente inferiores a los subcasos 21, mientras que para  $h_R = 0,2$  es lo contrario a excepción del subcaso 21.6 D.

Analizando los resultados entre perfil simple y doble se aprecia que para los subcasos 20 se aumenta el mismo % con un 37 %. En los subcasos 21 este incremento se alza entre un 43 y un 50 %.

Si se fija en los valores de impacto del coche (ensayo TB11), todos los subcasos lo superan con creces con factores de seguridad superiores al 1,8. En cambio, para el impacto con el autobús (ensayo TB51), la barrera solo resiste en los subcasos 20.5 D, 21.3 D, 21.5 D, 20.6 S/D y 20.6 S/D. Por tanto, considerando una carga lineal de 1,5 m de longitud y aplicada a una altura  $h_R = 0,2$  m, el perfil aguanta al choque de un autocar.

#### Resumen de resultados de los casos 16 - 21

Después del análisis de los casos 16 -21 se presenta en la Tabla 6.20 un resumen de los principales resultados obtenidos. En ella, se muestran los subcasos que han tenido la carga de rotura más baja según el tipo y modo de carga que lo determina. Además, para el subcaso con

rotura mínima se expone si resiste a los impactos de diseño del coche (ensayo TB11) y del autocar (TB51).

Carga	Aplicación	Medidas de la carga (m)			Subcasos	Resistencia		
						TB11	TB51	
Puntual	Coronación	-			16.2	No	No	
Puntual	Debajo de la coronación	$h_R$	0,1		17.1/18.1	Sí	No	
			0,2		18.4			
Lineal	Coronación	$L_f$	0,5		19.4	Sí	No	
			1		19.2			
			1,5		19.3			
Lineal	Debajo de la coronación	$h_R$	0,1	$L_f$	0,5	20.1	Sí	No
					1	20.2		No
					1,5	20.3		No
		0,2	$L_f$	0,5	21.4	No		
				1	21.5	**No		
				1,5	*21.6	Sí		

\*Excepto para el subcaso 21.6 D, donde el subcaso 20.6 D es más bajo.

\*\*Sólo resiste para el subcaso 21.5 D.

*Tabla 6.20. Resumen de resultados de los casos 16 -21.*

En la Tabla 6.20 se ve que los casos de rotura con mayor probabilidad de producirse son los que tienen forma triangular para cargas en coronación y forma trapezoidal para cargas por debajo de la coronación. De esta manera se cumple con lo observado en casos reales de impacto (ver Tabla 6.3), donde las formas de rotura se asimilan a los obtenidos.

En referencia a la resistencia de la barrera, todos los casos menos la carga puntual en coronación resiste el choque del coche TB11 y en muy pocos casos para el autobús (ensayo TB51). Sólo se puede asegurar que resiste para cargas lineales de 1,5 m aplicadas a 0,2 m de la coronación.

#### Casos 22 y 23: Rotura en los pre-cortes

Una vez analizados los diferentes casos de rotura de la parte superior del perfil, se presentan en la Figura 6.8 los resultados de los casos 22 y 23. Para el caso 23, se muestran 3 subcasos según la longitud lineal de carga de 0,5 m, 1 m y 1,5 m.

Tal y como se puede ver en la Figura 6.8, prácticamente no existen diferencias según el subcaso considerado. De todos ellos, se puede decir que la carga de rotura se sitúa en unos 30 kN para el perfil simple, y unos 44 kN para el perfil doble. Estos resultados destacan por lo bajos que son frente a los valores de rotura analizados (una horquilla de valores entre 90 y 840 kN) para los casos 16 – 21 del mismo perfil. Por tanto, **los casos 22 y 23 se producirán primero y posteriormente es posible de que aparezcan las roturas planteadas de los casos 16 -21 de la parte superior de la barrera (ver Tabla 6.20)**. Adicionalmente, se ve claramente que el perfil se rompe para los impactos de diseño de la barrera, tanto para el coche (TB11, 119 kN) como el autobús (TB51, 510 kN).

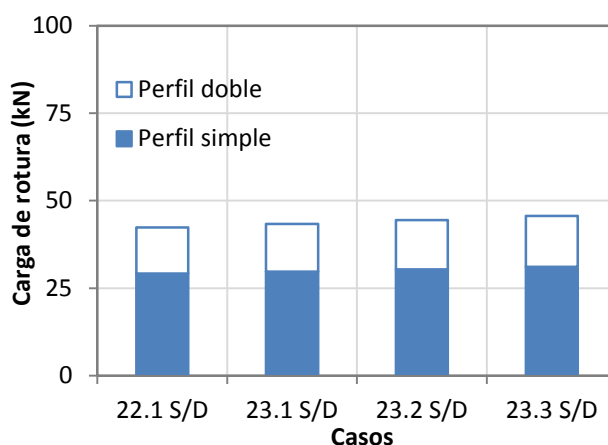


Figura 6.8. Resultados de los casos 22 y 23.

#### Rotura a punzonamiento

Siguiendo el modo de cálculo a punzonamiento del artículo 46 de la EHE 08, en la Figura 6.9 se muestran los desarrollos de las tensiones producidas por los impactos del coche (ensayo TB11) y del autobús (ensayo TB51) según el espesor de hormigón presente. Además se traza una línea de tensión límite que indica la tensión máxima que resiste el hormigón.

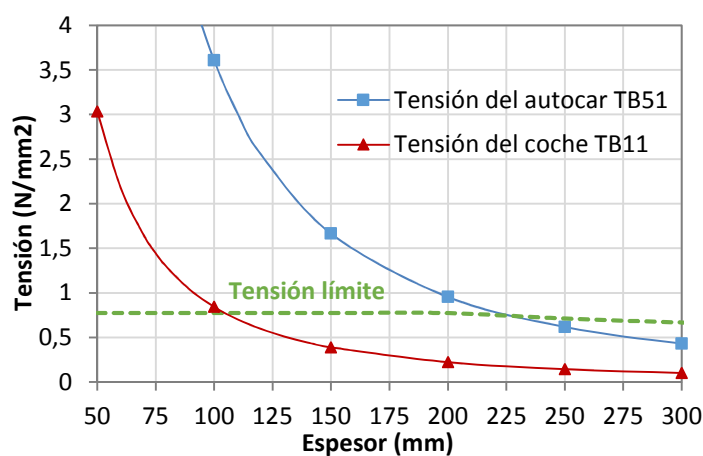


Figura 6.9. Tensiones de cálculo de impacto según el espesor.

Se observa que para el impacto de un automóvil (TB11) el espesor necesario para que no se produzca rotura es de 10,5 cm. En cambio, para el choque de un autobús (TB51) el grosor mínimo se incrementa hasta alcanzar los 23 cm. Si resulta de interés, en el Anejo 8 se puede ver el modo y las consideraciones de cálculo realizadas.

Con estos resultados se procedió a la construcción del perfil 122 con un espesor de hormigón medio en la zona del plinto superior a los 13 cm para asegurar que resistiera el choque del coche del ensayo TB11 y un adecuado fluido del hormigón durante su extrusión por el molde. En la Figura 6.10 se muestran dos fotografías post-impacto del perfil (Figura 6.10.a) y un detalle de la zona del plinto (Figura 6.10.b). Como se puede ver, el perfil no se rompió por esta zona, por lo que el grosor de hormigón del plinto fue suficiente.

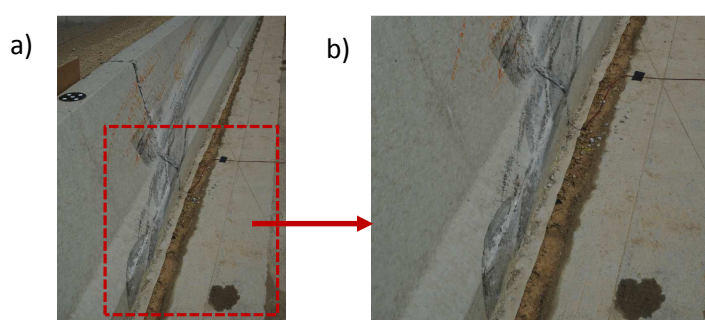


Figura 6.10. Estado del perfil 122 después del impacto del ensayo TB11. (Fuente: IDIADA, 2014)

### 6.5.3- Perfil 123

Inmediatamente se presentan los resultados obtenidos con el perfil 122 mostrando el siguiente orden según el tipo de carga aplicada: carga puntual en coronación, carga puntual por debajo de la coronación, carga lineal en la coronación y carga lineal por debajo de la coronación. Posteriormente, se enseñan los datos de los dos casos de rotura (casos 29 y 31) en los pre-cortes de la barrera.

#### Carga puntual en coronación

En la Figura 6.11 se presentan los resultados obtenidos con el caso 24 referente a la aplicación de una carga puntual en coronación. En ella, se ve que para cada subcaso (24.1 con  $H = 0,5$  m y 24.2 con  $H = 0,2$  m) se representa el valor de la carga de rotura del perfil simple y su aumento de resistencia debido al perfil doble.

Examinando los valores de rotura entre los 2 subcasos, se ve claramente que el subcaso 24.2, con una altura de rotura menor, es el que obtiene la carga de fallo más baja, con valores entre un 34 y un 42 % respecto a los subcasos 24.1 S y 24.1 D . También se aprecia un incremento desigual entre perfil simple y doble según el subcaso. Para el subcaso 24.1 se aumenta un 28 % respecto del perfil simple, mientras que para el 24.2 se incrementa justo la mitad, un 14 %. Este comportamiento se debe a la mayor influencia en el grosor del perfil con una altura de rotura mayor ( $H$ ) para el subcaso 24.1 frente al 24.2.

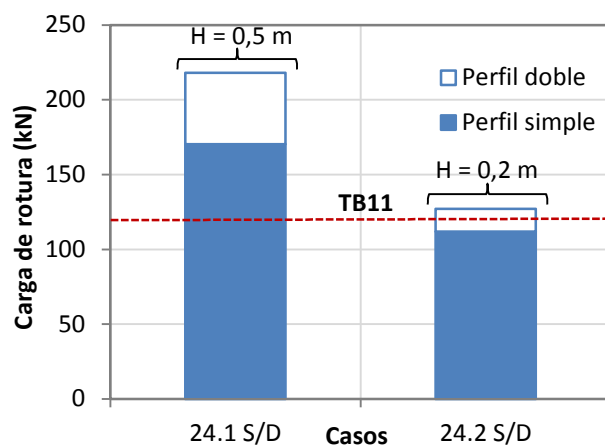


Figura 6.11. Resultados caso 24.

Si se comparan estos valores de rotura con las cargas de impacto del coche (ensayo TB11) y del autocar (ensayo TB51), se desprende que en ningún caso resiste el choque de un autocar con factores de seguridad entre 0,2 y 0,4. Pero en cambio el impacto del automóvil resiste todos los subcasos excepto el 24.2 S con un factor de seguridad de 0,9.

#### Carga puntual por debajo de la coronación

En la Figura 6.12 se presentan los resultados obtenidos con los subcasos planteados a partir de los casos 25 y 26. Los subcasos con subíndices 1 – 3 corresponden a una altura de aplicación de la carga de  $h_R = 0,1$  m; y para los subíndices 5 – 6 son para alturas de  $h_R = 0,2$  m. Además se presentan los incrementos producidos por el perfil doble.

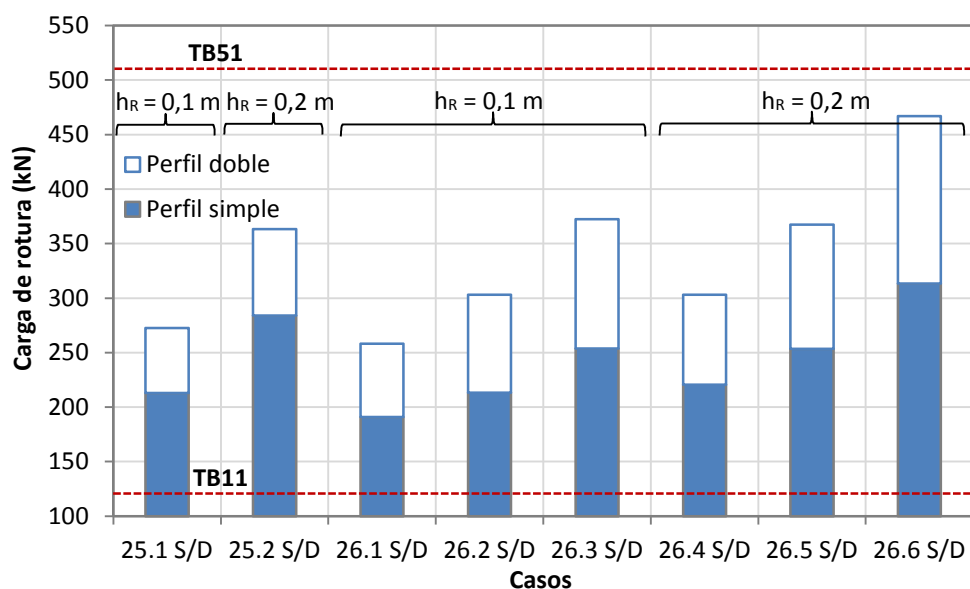


Figura 6.12. Resultados de los subcasos 25 y 26.

Analizando los resultados con  $h_R = 0,1$  m, se comprueba que los subcasos 26.1 S/D obtienen los valores de rotura más bajos siendo entre un 5 % y un 10 % inferior a los subcasos



siguientes con carga más pequeña (25.1 S/D y 26.2 S). Respecto a los resultados con  $h_R = 0,2$  m, el subcaso 26.4 es el que obtiene la carga de rotura mínima a cierta distancia (alrededor de un 15 – 20 % superior) del siguiente subcaso (26.5). Para los subcasos 26, a medida que se aumenta el parámetro geométrico  $a_R$  se producen incrementos de rotura aproximadamente de un 15 - 30 %. Fijándose en los datos de los perfiles dobles, todos ellos son entre un 30 y un 50 % superior al perfil simple.

Evaluando los valores de choque de los ensayos del coche (TB11) y del autobús (TB51), en todos los subcasos, la barrera resiste el impacto del vehículo ligero pero no el del autocar. Los factores de seguridad en el caso del coche son holgados con valores superiores al 1,6.

#### Carga lineal en coronación

En la Figura 6.13 se presenta los resultados con una carga lineal en coronación ya sea con el perfil simple o doble. Para cada subcaso se distingue la forma de rotura según la longitud de la carga lineal ( $L_f = 0,5, 1$  y  $1,5$  m) y de la altura de rotura de la barrera ( $H = 0,5$  y  $0,2$  m).

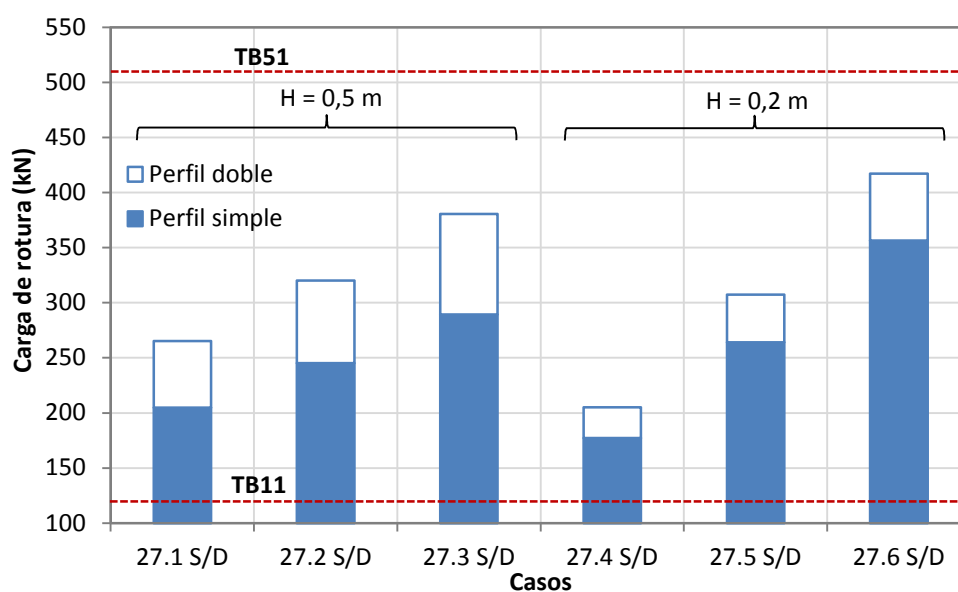


Figura 6.13. Resultados de los subcasos 27.

Analizando los resultados de la Figura 6.13 se desprende que los subcasos 27.1 y 27.4 son los que tienen los menores valores para alturas de rotura de 0,5 m y 0,2 m respectivamente. Entre los subcasos 27.1 S y 27.4 S, el segundo es un 13 % inferior al primero por lo que es más susceptible de que la rotura se produzca con  $H = 0,2$  m. Pero si se aumenta la longitud de la carga lineal de 0,5 m a 1 m y de 1 m a 1,5 m, la carga se incrementa del orden de un 20 % para  $H = 0,5$  m y del orden de un 35 - 50 % para  $H = 0,2$  m. Este desarrollo dispar entre ambas alturas de rotura traduce que a partir de una longitud de carga de 1 m, los subcasos con  $H = 0,5$  m y 0,2 m obtienen valores parecidos; y para longitudes de carga de 1,5 m, los subcasos 27.3 con  $H = 0,5$  m son inferiores a los subcasos 27.6 con  $H = 0,2$  m..

En cuanto a los resultados entre perfil simple y doble se tienen dos comportamientos diferentes. Mientras que para los subcasos con  $H = 0,5$  se alcanzan subidas de un 30 %; los subcasos con  $H = 0,2$  m se sitúan a la mitad.

Para finalizar, si se estudia la resistencia del choque de un coche (TB11) se ve que en todos los subcasos la barrera no cede, con factores de seguridad por encima del 1,5. Por otro lado, el impacto del autobús (TB51) implica el fallo de la estructura con factores de seguridad por debajo del 0,8.

#### Carga lineal por debajo de la coronación

Para este caso, se presentan en la Figura 6.14 los resultados obtenidos con una carga lineal por debajo de la coronación según corresponda al perfil simple o doble. Además, para cada subcaso se distingue la forma de rotura según la longitud de la carga lineal ( $L_f$ ) y de la altura de aplicación por debajo de la coronación ( $h_R$ ).

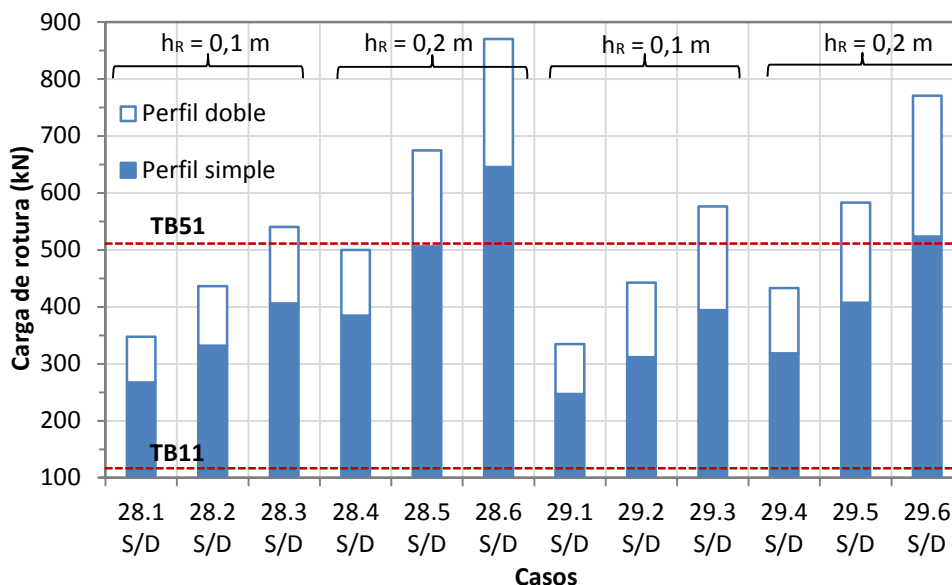


Figura 6.14. resultados de los casos 28 y 29.

Se observa que para los subcasos con  $h_R = 0,2$  m, que los subcasos 29 obtienen valores de rotura más bajos que los subcasos 28, donde estos últimos son un 20 – 25 % superiores a los subcasos 29. En cuanto a los subcasos con  $h_R = 0,1$  m, no se aprecian diferencias significativas entre los subcasos 28 y 29 con la misma longitud de carga lineal ( $L_f$ ), con diferencias máximas del orden del 8 %. Fijándose más detenidamente con  $h_R = 0,1$  m, los perfiles simples de los subcasos 29 son más bajos, mientras que los perfiles dobles son los subcasos 29 a excepción del 28.1 D.

Analizando los resultados entre perfil simple y doble se aprecia que para los subcasos 28 se aumenta aproximadamente un 30 - 35 %. Y en los subcasos 29 este incremento se alza entre un 36 y un 47 %.

Finalmente si se fija en los valores de impacto del coche (ensayo TB11), todos los subcasos lo superan con creces con factores de seguridad superiores al 2,1. En cambio, para el impacto con el autobús (ensayo TB51), la barrera solo resiste en los subcasos 28.3 D, 28.5 D, 29.3 D, 29.5 D, 28.6 S/D y 29.6 S/D. Es decir, se puede asegurar que considerando una carga lineal de 1,5 m de longitud y aplicada a una altura  $h_R = 0,2$  m, el perfil aguanta al choque de un autocar, pero los demás sólo si es un perfil doble y una carga lineal de 1 m.

#### Resumen de resultados de los casos 24 - 29

Después del análisis de los casos 24 -29 se presenta en la Tabla 6.21 un resumen de los principales resultados obtenidos. En ella, se muestran los subcasos que han tenido la carga de rotura más baja según el tipo y modo de carga que lo determina. Además, para el subcaso con rotura mínima se expone si resiste a los impactos de diseño del coche (ensayo TB11) y del autocar (TB51).

Carga	Aplicación	Medidas de la carga (m)			Subcasos	Resistencia	
						TB11	TB51
Puntual	Coronación	-			24.2	No	No
Puntual	Debajo de la coronación	$h_R$	0,1		26.1	Sí	No
			0,2		26.4		
Lineal	Coronación	$L_f$	0,5		27.4	Sí	No
			1		27.2		
			1,5		27.3		
Lineal	Debajo de la coronación	0,1	$L_f$	0,5	28.1	Sí	No
				1	28.2		No
				1,5	*29.3		**No
		0,2	$L_f$	0,5	29.4		No
				1	29.5		**No
				1,5	29.6		Sí

\*Excepto para el subcaso 29.3 D, donde el subcaso 28.3 D es más bajo.

\*\*Sólo resiste para los subcasos con perfil doble: 28.3 D y 29.5 D.

*Tabla 6.21. Resumen de resultados de los casos 24 -29.*

En la Tabla 6.21 se ve que los casos de rotura con mayor probabilidad de producirse son los que tienen forma triangular, para cargas en coronación, y forma trapezoidal, para cargas por debajo de la coronación. De esta manera se cumple con lo observado en casos reales de impacto (ver Tabla 6.4), donde las formas de rotura se asimilan a los obtenidos.

Si estudia la capacidad resistente de la barrera, de modo análogo al perfil 122, todos los casos menos la carga puntual en coronación resiste el choque del coche TB11 y en muy pocos casos para el autobús (ensayo TB51). Sólo se puede asegurar que el perfil resiste para cargas lineales de 1,5 m aplicadas a 0,2 m de la coronación.

#### Casos 30 y 31: Rotura en los precortes

Para estos dos casos, en la Figura 6.15 se presentan de forma conjunta los resultados obtenidos. Para el caso 31, se muestran 3 subcasos según al longitud lineal de carga de 0,5 m, 1 m y 1,5 m.

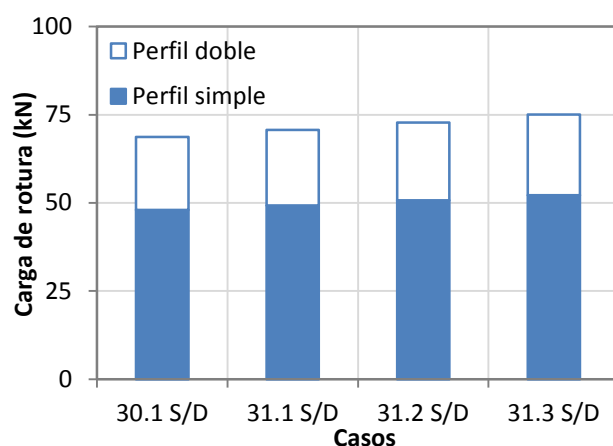


Figura 6.15. Resultados de los casos 30 y 31.

Tal y como se observa en la Figura 6.15, prácticamente no existen diferencias según el subcaso considerado. Sobre todos ellos, se puede decir que la carga de rotura se sitúa en unos 50 kN para el perfil simple y unos 70 kN para el perfil doble. Estos resultados destacan por lo bajos que son frente a los valores de rotura analizados (una horquilla de valores entre 110 y 870 kN) para los casos 24 – 29 del mismo perfil.

Por tanto, **los casos 30 y 31 se producirán primero y posteriormente es posible de que aparezcan las roturas planteadas de los casos 24 -29 de la parte superior de la barrera (ver Tabla 6.21)**. Por otro lado, se ve claramente que el perfil se rompe para los impactos de diseño de la barrera, tanto para el coche (TB11, 119 kN) como el autobús (TB51, 510 kN).

## 6.6.- CONCLUSIONES

Después de analizar todos los resultados de los cálculos a rotura de los perfiles 51, 122 y 123; se procede a presentar las principales conclusiones del presente capítulo. En ellas, se da respuesta a todos los objetivos planteados de inicio, añadiendo las principales ideas más relevantes.

- Los casos de rotura más probables con el perfil 51 son aquellos que tienen forma de

mordisco, ya sea en forma trapezoidal o circular según el tipo y modo de carga (casos 3, 5, 10, 12 y 13).

- Los casos de rotura con los perfiles 122 y 123 vienen condicionados por la presencia de los pre-cortes como zonas más débiles de la barrera. En base a esta premisa las formas de rotura con mayor probabilidad de producirse son los que tienen formas triangulares y trapezoidales. Las formas triangulares tienen tendencia más a surgir cuando la carga actúa en coronación o cerca de la misma (casos 16/24, 19,27 y 20/28); mientras que las formas trapezoidales aparecen con cargas actuando por debajo de la coronación (casos 18/26 y 21/29).
- Para los perfiles con pre-cortes, 122 y 123, antes de producirse la rotura de la parte superior de la barrera, primero se romperá verticalmente por los pre-cortes (casos 22/30 y 23/31) actuando los pre-cortes como rótulas.
- En los 3 perfiles estudiados con roturas en la parte superior de la barrera se observa que en la mayoría de los casos el perfil resiste el impacto de un coche (ensayo TB11), excepto para una carga puntual en la coronación (forma de carga que no se da a la realidad). Para una carga lineal de 1,5 m a 0,2 m de la coronación (forma de carga más próxima a la realidad) el factor de seguridad se sitúa por encima de 2.
- Para el caso de impacto de un vehículo más pesado como el del ensayo TB51 con autocar, la barrera resiste para una carga lineal de 1,5 m a 0,2 m de la coronación. En base a estas consideraciones el espesor de coronación de 15 cm es suficiente para resistir el choque.
- En los resultados del perfil 51 se desprende que es posible la sustitución de las 2 barras de acero longitudinales por fibras. Según el subcaso estudiado los contenidos de fibras, plásticas o de acero, varían de manera notoria.

## CAPÍTULO 7

### Conclusiones

#### 7.1.- INTRODUCCIÓN

El presente capítulo tiene como objetivo exponer las principales conclusiones derivadas de los estudios realizados a lo largo de esta Tesis Doctoral. Estas conclusiones se presentan en forma de conclusiones generales y de conclusiones específicas.

Las **conclusiones generales** responden al cumplimiento del objetivo principal que ha guiado el desarrollo del presente estudio. Dicho objetivo consiste en diseñar una nueva barrera de hormigón *in situ* de clase A o B. Para ello, el trabajo de esta tesis se ha concentrado en obtener una barrera más segura, intentado contener los costes y el consumo de materiales respecto a las alternativas existentes de barreras de hormigón *in situ*.

Las **conclusiones específicas** obedecen a los distintos aspectos estudiados para el diseño de una barrera de hormigón *in situ*. Los temas que se han tenido en cuenta para la consecución de la nueva barrera son los siguientes: los aspectos geométricos del perfil de barrera que inciden sobre la respuesta vehículo - estructura; la contrastación experimental de los ensayos de impacto; los parámetros mecánicos tanto de la barrera como del vehículo que determinan el comportamiento del conjunto; el diseño estructural resistente de la barrera frente al impacto.

Por último, se presentan las **líneas futuras de investigación** que podrían derivarse a partir de los trabajos realizados.

## 7.2.- CONCLUSIONES GENERALES

En esta Tesis Doctoral se ha conseguido obtener **dos perfiles de barrera de hormigón *in situ* de clase B**, cumpliendo con el objetivo principal en materia de seguridad. Los dos **perfiles** de barrera que cumplen con dicho hito son los tipificados con los números **122 y 123** de acuerdo con la numeración establecida en esta investigación. En la Tabla 7.1 se muestra la forma geométrica base de los dos perfiles solución (perfil 51) y la composición de ambas.

Perfil	Forma geométrica base	Estructura de la barrera (cotas en cm)
122	<p>Perfil 51</p> <p>Area = 0,351 m<sup>2</sup> (Cotas en mm)</p>	<p>Vista longitudinal</p> <p>Vista transversal</p> <p>Pre-corte</p> <p>Hormigón con fibras</p> <p>Perfil de porexpan</p> <p>Capa de plástico</p>
123	<p>Area = 0,351 m<sup>2</sup> (Cotas en mm)</p>	<p>Vista longitudinal</p> <p>Vista transversal</p> <p>Pre-corte</p> <p>Hormigón</p> <p>Perfil de porexpan</p> <p>3φ12</p>

Tabla 7.1. Perfiles 122 y 123.

En base a la consecución de estos dos perfiles, se exponen las siguientes conclusiones generales:

- Mediante el estudio de la **forma geométrica** del perfil de barrera se determina un rango de valores **ASI comprendidos entre 1,5 y 1,8**. Por tanto, con sólo la modificación geométrica del perfil no ha sido posible obtener barreras de hormigón *in situ* de clase A o B. En esta fase de la investigación, la geometría más adecuada de perfil de entre las estudiadas ha resultado ser el **perfil 51** que ha servido como perfil base para el diseño de la nueva barrera.
- Para poder reducir el índice **ASI a valores iguales o menores de 1,4**, es necesario dotar la **barrera** de cierta **flexibilidad** ante el impacto; persiguiendo así que la barrera absorba parte de la energía liberada en la fase de impacto y, en consecuencia, también la magnitud de las aceleraciones del vehículo y del valor del ASI. Para ello, es necesario recurrir a varias medidas que conduzcan a un aumento de la deflexión dinámica de la barrera, entre estas:

1. **Reducir el rozamiento** entre la barrera y el suelo con la colocación de una **capa de plástico** y/o un **perfil de porexpan**.
  2. **Reducir el peso** de la barrera por metro lineal mediante la colocación de un **perfil de porexpan** que disminuye la sección de hormigón.
  3. **Inducir la aparición de rótulas** cada 3 metros para incrementar la flexibilidad de la barrera en régimen de impacto mediante la realización de **pre-cortes** en la sección del perfil. En el caso de la barrera diseñada, estos pre-cortes tienen una profundidad de 4 cm y es donde se concentran las fisuras de retracción.
  4. Garantizar **resistencia post-residual** de las fisuras inducidas por los pre-cortes con el empleo de **hormigón con fibras** (perfil 122, con 2 Kg/m<sup>3</sup> de macro-fibras plásticas) o la colocación de **3 $\phi$ 12** (perfil 123). Estas cuantías de armadura responden a mínimos necesarios para que en las superficies de rotura se alcancen los esfuerzos resistentes requeridos según las fuerzas de impacto estimadas para cada tipo de vehículo.
- En base al análisis estructural llevado a cabo, se deriva que los perfiles 122 y 123 conducen a factores de seguridad superiores a 2,00 a la **resistencia frente al impacto** del vehículo del ensayo TB11.

### 7.3.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

#### Aspectos geométricos del perfil de barrera

- Se ha conseguido determinar una forma de perfil tipo que conduce a las mejores prestaciones de seguridad y minimizando los valores del ASI.
- Los parámetros que tienen más peso en relación a los valores del ASI son la altura de plinto (a) y la zona de transición entre el plinto y la parte superior de la barrera (b, g y  $\gamma$ ). En menor medida, también se debe tener en cuenta el ángulo de inclinación de la parte superior de la barrera ( $\beta$ ).

#### Contrastación experimental de las diferentes formas de perfil propuestas

- Paralelamente con el desarrollo del estudio de la forma geométrica del perfil, se han llevado a cabo 7 ensayos experimentales con perfiles cuya geometría ha sido evolutiva en base a los resultados experimentales. La geometría a ensayar en cada nueva realización ha sido previamente definida teniendo en cuenta los resultados experimentales y las simulaciones numéricas del impacto. En este sentido, se enfatiza que los resultados numéricos y experimentales del ASI tienden a converger con el aumento del número de ensayos experimentales fruto de la calibración de los parámetros constitutivos del modelo. Se concluye que el ASI del modelo de simulación



tiene un intervalo de confianza de  $\pm 0,1$ , por lo que se puede considerar que el modelo reproduce adecuadamente los fenómenos que se producen en fase de impacto.

- La optimización evolutiva de la geometría del perfil ha permitido pasar de valores del ASI de 1,9 para el perfil R1 y de 1,7 para el perfil R2 hasta de 1,5 para el perfil 51 (ensayo 51 2º).
- La modificación del perfil debe complementarse con otras medidas tecnológicas para lograr alcanzar valores de  $ASI \leq 1,4$ . Así, adicionalmente a la propuesta de geometría del perfil, se ha planteado la modificación de las condiciones de ensayo respetando las tolerancias que exige la norma EN 1317 (2010). Si bien, con las modificaciones del ensayo de impacto 51 3º se ha conseguido obtener un  $ASI = 1,4$ ; no se ha cumplido las exigencias de seguridad de la norma debido al vuelco del vehículo.
- De los resultados experimentales, se deduce que para ángulos de rotación  $\varphi_x \geq 51^\circ$  y velocidades de rotación  $w_x \geq 53$  °/s del vehículo, pueden conducir al vuelco del vehículo. En este sentido, los perfiles 73, 119 y 51 3º han presentado el vuelco del vehículo durante el ensayo de impacto.

#### Aspectos mecánicos para el diseño de la barrera

- Esta conclusión es repetitiva y, más bien, es una conclusión de índole tecnológica; pues tu no modificas la resistencia del material (aspecto mecánico) para lograr un menor ASI. Elimina esta conclusión, ya está incorporada en otras conclusiones anteriores.
- Se ha probado que una función exponencial 4-paramétrica describe el desplazamiento máximo de la barrera en el tiempo si se ajustan los parámetros adecuadamente con los resultados de los ensayos. En base a esta función, se puede estimar el desplazamiento máximo de la barrera y conocer de antemano su flexibilidad.
- Se propone una ecuación empírica que permite estimar el valor del ASI en función del desplazamiento máximo de la barrera en fase de ensayo.

#### Diseño resistente

- Los análisis abordados mediante el método de las líneas de rotura conducen a que para hacer frente a la carga puntual en coronación de un ensayo TB11, se requiere que el espesor en coronación sea de, como mínimo, 15 cm.
- Se ha probado mediante el análisis resistente de las barreras que es posible substituir la armadura pasiva que se emplea habitualmente para dar capacidad a flexión de la sección transversal de la barrera. En el caso particular del perfil propuesto, las dos barras de acero utilizadas en la sección base se pueden substituir por  $2 \text{ kg/m}^3$  de macro-fibras plásticas.

## 7.4.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo desarrollado en esta Tesis Doctoral y los resultados obtenidos representan un avance significativo en el diseño de barreras de hormigón *in situ* a nivel de seguridad.

En este sentido, a nivel nacional, aún no se ha desarrollado otra barrera de hormigón *in situ* que garantice un nivel de seguridad B. Sin embargo, queda un largo camino para estudiar y mejorar el trabajo realizado de esta tesis. Por ello, a continuación se presentan las posibles líneas de investigación con las que dar oportunidad al trabajo realizado en esta investigación.

- Desarrollar modelos, que permitan la misma precisión, pero que reduzcan el volumen de datos y la carga computacional para poder llevar análisis paramétricos reduciendo el tiempo de cálculo.
- Optimizar las propuestas tecnológicas planteadas para reducir el valor del ASI con el fin de minimizar el coste de la solución y garantizar su competitividad.
- Mejorar la ecuación 4-parámetrica presentada en esta tesis que reproduce el desplazamiento de la barrera en el tiempo, correlacionándola con un mayor número de ensayos de impacto de barreras de hormigón *in situ* distintas. Del mismo modo, mejorar la ecuación que determina el índice ASI a partir del desplazamiento máximo con más ensayos de impacto. Adicionalmente, sería interesante ver si otras variables como por ejemplo el desplazamiento medido en el instante de ASI máximo son más idóneas para predecir el ASI.
- Comprobar el nivel resistente de las barreras propuestas frente al impacto de vehículos pesados siguiendo la norma EN 1317.
- Estudiar la repetitividad del ensayo de impacto TB11 para saber cuál es el intervalo de confianza y la precisión de resultados de los índices ASI y THIV.
- Evaluar la repetitividad de los resultados llevando a cabo el ensayo de impacto sobre la misma barrera con modelos de turismos distintos.



## Bibliografía

**AASHTO LFRD (2012)** AASHTO LFRD bridge Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC..

**Abdel-Aty M.A., Chen C. Y Schott J.R. (1998)** An assessment of the effect of driver age on traffic accident involvement using log-linear models. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 30, No. 6, pp. 851-861.

**Advisory Circular, AC 20-146 (2003)** Methodology for dynamic seat certification by analysis for use in part 23, 25, 27, and 29 airplanes and rotorcraft. Federal Aviation Administration, USA.

**Alani A.M. y Beckett D. (2013)** Mechanical properties of a large scale synthetic fiber reinforced concrete ground slab. *Construction and Building Materials*, Vol. 41, April 2013, pp. 335-344.

**Alarcón D. B. (2005)** Modelo integrado de valor para estructuras sostenibles. Tesis Doctoral. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya.

**Alberson D. C., Williams W. F., Mengers W. L. y Hauig R. R. (2004)** Testing and Evaluation of the Florida Jersey Safety Shaped Bridge Rail. Report FHWA/TX-049-8132-1, Federal Highway Administration, Washington, D.C..

**Alberson D. C. (2006)** Research Findings for LFRD Deck Designs. FICE/FDOT Design Conference 2006. Texas Transportation Institute/ Texas A&M Univ.

**Albuquerque F.D.B (2011)** Evaluation of the in-service safety performance of safety-shape and vertical concrete barriers. *ETD Collection for University of Nebraska - Lincoln*. Paper AAI3466470.

- Albuquerque F.D.B. (2011)** Evaluation of the in-service safety performance of safety-shape and vertical concrete barriers. Tesis Doctoral. University of Nebraska, Lincoln, Nebraska.
- Albuquerque F.D.B. y Sicking D.L. (2013)** In-service safety performance evaluation of roadside concrete barriers. *Journal of Transportation Safety & Security*. Vol. 5, No. 2, pp. 148-164.
- Amato G., O'Brien F., Simms C. y Ghosh B. (2011)** Development of roadside safety barriers using natural building materials. ITRN - Irish Transport Research Network Annual Conference 2011.
- Amato G., O'Brien, Ghosh B., Williams G. y Simms C. (2013)** A scaling method for modelling the crashworthiness of novel roadside barrier designs. *International Journal of Crashworthiness*, Vol.18, No. 1, pp. 93-102.
- Anghileri M., Luminari M. y Williams G. (2005)** Analysis of test data from European Laboratories. Robust Project, Deliverable D.2.1.
- AS/NZS 3845 (1999)** Australian / New Zealand Standard for Road Safety Barrier Systems. CE/33 Committee, ISBN 0 7337 2293 8, 1999.
- Atahan A.O. (2006)** Finite element crash test simulation of New York portable concrete barrier with I-shaped connector. *Journal Structural Engineering (ASCE)* 132, pp. 430-440.
- Atahan A.O. y Sevim U.K. (2008)** Testing and comparison of concrete barriers containing shredded waste tire chips. *Materials Letters*, Vol. 62, No. 21-22, pp. 3754-3757.
- Attanayake U., Duyar O.O. y Aktan H. M. (2004)** Early - age cracking potential of slip formed concrete bridge barriers. Presented at 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Bartolomé C. y Díaz J. (2011)** Barreras de hormigón: por unas carreteras más seguras. *Cimbra*, No. 394, pp. 38-47.
- Bateman M.B., Howard I.C., Jonhson A.R. y Walton J.M. (2001)** Computer simulation of the impact performance of a wire rope safety fence. *International Journal Impact Engineering*, Vol. 25, pp. 67-85.
- Beason W.L., Ross H.E., Perera H.S., Campise W.L. y Bullard D.L. (1989)** Development of a single-slope concrete median barrier. Report No 9429CDK-1. Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, Texas. State Department of Highways and Public Transportation.
- Beason W., Ross H., Perera H. y Marek M. (1991)** Single-slope concrete median barrier. *Transportation Research Record*. No. 1302, pp. 11-23. Transportation Research Board. Washington D.C.

**Beaton J.L. (1956)** Full dynamic tests of concrete bridge rails subjected to automobile impacts. Proceedings of the 35th Annual Meeting of Highway Research Board, Vol. 35, pp. 251-267.

**Biel T. D. y Lee H. (1994)** Use of recycled tire rubbers in concrete. Infrastructure: new materials and methods of repair. Third Materials Engineering Conference, San Diego, California.

**Blanco A. (2008)** Durabilidad del hormigón con fibras de acero. Tesina de especialidad. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya.

**Bligh R.P., Briaud J.L. Kim K.M y Abu-Odeh A. (2010)** Design of roadside barrier systems placed on MSE retaining walls. NCHRP Report 663. Texas Transportation Institute. Texas A&M University System College Station, TX.

**Bonin G., Cantisani G. y Loprencipe G. (2003)** Analisi teorico-sperimentale delle prove di crash. *Le Strade*. 10/2003, pp. 134-142.

**Bonin G., Cantisani G., Loprencipe G. y Ranzo A. (2004)** Road Safety Barriers with Short Elements of Lightweight Concrete. 2nd International SIIV (Società Italiana Infrastrutture Viarie – Strade, Ferrovie e Aeroporti) Congress, Florence.

**Borovinsek M., Vesenjajk M., Ulbin M. y Ren Z. (2007)** Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 25, pp. 67-85.

**Briglia P.M., Benac J.D., Geno D.E. y McDonald K.A. (1983)** An Evaluation of Concrete Median Barrier in Michigan. Report no. TSD.531-83. Michigan Department of Transportation, Michigan.

**Britpave (2004)** In situ concrete safety barrier: Concrete step barrier. Specification. CSB/10. Britpave, The British Cementitious Paving Association. ([www.britpave.org.uk](http://www.britpave.org.uk)).

**Bronstad M.E., Calcote L.R. y Kimball C.E. (1976)** Concrete median barrier Research. Report n. FHWA-RD-77-3 and 77-4. Federal Highway Administration. Washington DC.

**Buckingham E. (1914)** On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Physical Review*, Vol. 4, No. 4, pp. 345-376.

**Buckingham E. (1915)** The principle of similitude. *Nature*, 96, pp. 396-397.

**Bullard D.L., Sheikh N.M., Bligh R.P., Haugh R.R. Schutt J.R. y Storey B.J. (2006)** Aesthetic Concrete Barrier Design. NCHRP Report 554. Transportation Research Board, Washington DC.

**Buratti N., Mazzotti C. y Savoia M. (2011)** Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 5, pp. 2713-2722.

**Buyuk M., Marzougui D. Kan C. y Kurtaran H. (2008)** A multi-objective discrete design optimization algorithm for portable concrete barriers by coupling grey relational analysis with

successive Taguchi method. Working Paper: NCAC 2007-W-005. The National Crash Analysis Center.

**Calamani S., Lombardi L. y Bianchi A. (2007)** L'esperienza AISICO nel settore dei crash test di dispositivi di sicurezza stradale. *Strade & Autostrade*, No. 5, 2007.

**California Department of Transportation (2002)** California highway barrier aesthetics. California Highway Barrier Aesthetics Report. Edition 1, June 2002. ([http://www.dot.ca.gov/hq/LandArch/16\\_la\\_design/aesthetics/barriers/index.htm](http://www.dot.ca.gov/hq/LandArch/16_la_design/aesthetics/barriers/index.htm)).

**Calloway B. (1993)** Yield line analysis of an AASHTO New Jersey concrete parapet wall. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

**Carey A. y Grzebieta R. (2004)** New generation water-filled barriers promote safety. *Roads*, April/May 2004, pp. 37-45.

**Casas E. (2009)** Consideraciones de diseño en relación al hormigón deslizado. Aplicación a elementos lineales ejecutados in situ. Tesina de especialidad. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

**Casas E., Ramos G., Ainchil J., Aguado A., Agulló L. y Ríos, C. (2011)** Optimización técnica y económica de hormigones deslizados para barreras New Jersey. Resúmenes de comunicaciones, pp. 339-340. 10 páginas en texto completo. Ponencia 170. V Congreso de la Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural, Barcelona, España.

**Cengiz O. y Turanli L. (2004)** Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 8, pp. 1357-1364.

**Chi, M. (1976)** Assessment of Injury Criteria in Roadside Barrier Tests. Report FHWA-RD-75-74. FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C..

**Clay H., Gabauer D. y Bowen D. (2005)** Evaluation of cross median crashes, final report. Report n. FHWA-NJ-2005-004. New Jersey Department of Transportation.

**Cohen M.D. y Olek J. (1989)** Silica fume in PCC: the effects of form on engineering performance. In *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 11, No. 11, pp. 43-47.

**Corredor, S. (2008)** Sistemas de contención de vehículos. *Carreteras*, No. 157, pp. 81-89.

**Corredor, S. (2012)** Sistemas de contención de vehículos: Perspectiva histórica y retos de futuro. *Carreteras*, No. 182, pp. 125-132.

**Documento Básico SE-AE (2009)** Seguridad Estructural. Acciones en la edificación. Código Técnico de la Edificación, CTE.

**Duncan C., Khattak A. y Council F. (1998)** Applying the ordered probit model to injury severity in truck-passenger car rear-end collisions. *Transportation Research Record*, No. 1635, pp. 63-71.

**EHE 08 (2008)** Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

**Emori R.I. (1973)** Scale models of automobile collisions with breakaway obstacles. *Experimental Mechanics*, Vol. 13, No. 2, pp. 64-69.

**EN 1991-1-1:2002** Eurocódigo 1: Acciones sobre las estructuras. Parte 1.1. Acciones Generales. Anexo B. Comité Europeo de Normalización (CEN).

**EN 1991-1-7:2006** Eurocódigo 1: Acciones sobre las estructuras. Parte 1.7. Acciones Accidentales. Comité Europeo de Normalización (CEN).

**EN 1991-1-7:2006** Eurocódigo 1: Acciones sobre las estructuras. Parte 1.7. Acciones Accidentales Anejo C. Comité Europeo de Normalización (CEN).

**EN 1991-2:2003** Eurocódigo 1: Acciones sobre las estructuras. Parte 2. Acciones de tráfico en puentes. Comité Europeo de Normalización (CEN).

**EN 1317-1 (2010)** Road restraint systems - Part 1: terminology and general criteria for test methods. Comité Européen de Normalisation (CEN).

**EN 1317-2 (2010)** Road restraint systems – Part 2: performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets. Comité Européen de Normalisation (CEN).

**EUPAVE (2012)** Concrete safety barriers: a safe and sustainable choice. European Concrete Paving Association, EUPAVE. Brussels, Belgium. December 2012.

**EuroNCAP (2004)** Frontal Impact Testing Protocol, Version 4.1.

**EuroNCAP (2004)** Assessment Protocol and Biomechanical Limits, Version 4.1.

**Gabauer D. y Gabler H. (2005)** Evaluation of the acceleration severity index threshold values utilizing event data recorder technology. *Transportation Research Record*. Journal of the Transportation Research Board, No. 1904, pp. 37-45.

**Gabauer D. y Thomson R. (2005)** Correlation of vehicle and roadside crash test injury criteria. Paper Number 05-0283. Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington, DC, June 6-9, 2005.

**Gabauer D. y Gabler H.C. (2008)** Comparison of roadside crash injury metrics using event data recorders. *Accident Analysis and Prevention* 40, No. 2, pp. 548-558.



- García A., Rocci S., Mijanjos J. y Pedraza F. (2007)** La sección transversal de las carreteras: un diseño orientado a la seguridad. *Revista de la Asociación Técnica de Carreteras*, No. 120, pp. 20-32.
- Garrido R., Bastos A., Almeida A. y Elvas J.P. (2014)** Prediction of road accident severity using the ordered probit model. *Transportation Research Procedia*, Vol. 3, pp. 214-223.
- GIVASA S.A. (2012)**. C/ Can Noguera, 13 · Polígon Industrial El Barcelonès · 08630 ABRERA ([www.givasa.com](http://www.givasa.com)).
- Green J.E. (1977)** Computer simulation of car-to-car collisions. SAE Paper No. 770015.
- Grzebieta R., Zou R., Jiang T. y Carey A. (2005)** Roadside hazard and barrier crashworthiness issues confronting vehicle and barrier manufactures and government regulators. Paper number 05-0149.
- Große U. y Valtonen J. (2004)** Suitable concrete barriers for Finland. Laboratory of Highway Engineering, University of Technology, Helsinki.
- FEMA (2000)** Final Report of the Motorcyclists & Crash Barriers Project. The Federation of European Motorcyclists Associations, Brussels, Belgium.
- Ferdous M.R., Abu-Odeh A., Bligh R.P., Jones H.L. y Sheikh N.M. (2011)** Performance limit analysis for common roadside and median barriers using LS-DYNA. *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 16, No. 6, pp. 691-706.
- Frías E. (2004)** Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- García J. (2004)** Diseño de hormigones dirigido a la aplicación. Tesina de especialidad. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Geng H., Chang N.Y. y Wang T. (2006)** Definition of yield zones on concrete barrier structures under a transverse impact load. *Advanced Technology in Transportation. Proceedings of the ninth International Conference*, August 13-16, 2006, Chicago, Illinois.
- Hafeez A., Khairudin M., Anwar K. y Shaw W. (2012)** Stability of high-deck buses in a rollover and contact-impact with traffic barriers. Research report, MRR 01/2012. Malaysian Institute of Road Safety Research (MIROS).
- Harrison T.L. (2004)** Design of fixed ram-resistant vehicle barriers for perimeter security. rational method to design vehicular barriers. *Structures 2004*, pp. 1-10.

**Hirsch T.J. (1978)** Analytical evaluation of Texas bridge rails to contain buses and trucks. Report No. FHWA TX78-230-2. Texas Transportation Institute, Texas A&M University, Texas, USA.

**Holmes B.S. y Sliter G. (1974)** Scale modelling of vehicle crashes - techniques, applicability and accuracy: cost effectiveness. *SAU Technical Paper Series*, No 740586. Society of Automotive, Warrendale, Pennsylvania.

**Holt E.E. y Leivo M.T. (2000)** Methods of reducing early age shrinkage. Proceedings of the International RILEM Workshop Shrinkage, Paris.

**Huynh H. y Raghavan D. (1997)** Durability of simulated shredded rubber tire in highly alkaline environments. *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, pp. 138-143.

**Hyde, A.S. (1968)** Biodynamics and Crashworthiness of Vehicle Structures. Wyle Laboratories Report WR68-3, Volume III, March 1968.

**IAP-11 (2011)** Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

**Institute for Road Safety Research SWOV (1986)** Safety barriers for motorways: shoulder and bridge safety barriers and impact attenuators surveyed and assessed. R-86-24. Lelischendam, the Netherlands.

**Iqbal M. (2010)** A rational method to design vehicular barriers. *Structure magazine*, September 2010, pp. 22-24.

**Itoh Y., Liu C. y Kusama R. (2007)** Modeling and simulation of collisions of heavy trucks with concrete barriers. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 133, No. 8, pp. 462-468.

**Jeon S.J., Choi M.S. y Kim Y.J. (2008)** Ultimate strength of concrete barrier by the yield line theory. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. Vol. 2, No. 1, pp. 57-62.

**Jewell J., Rowhani P., Stoughton R. y Crozier W. (1997)** Vehicular crash tests of a slip-formed, single slope, concrete median barrier with integral concrete glare screen. Report No FHWA/CA/ESC-98/02. California Department of Transportation, Sacramento, CA.

**Jiang T., Grzebieta R.H., Rehnitzer G., Richardson S. y Zhao X.L. (2003)** Review of car frontal stiffness equations for estimating vehicle impact velocities. Proceedings 18<sup>th</sup> International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. National Traffic Safety Administration, Nagoya, Japan, 11 pp.

**Jiang T., Grzebieta R.H. y Zhao L. (2004)** Predicting impact loads of a car crashing into a concrete roadside safety barrier. *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 9, No. 1 pp. 45-63.

**Jiang T., Grzebieta R.H. y Zhao X.L. (2013)** Determining lateral deflections of plastic water-filled barriers. Civil Engineering, faculty of Engineering, Monash University, Melbourne, Australia.

**Johansen K.W. (1962)** Yield Line Theory. Cement and Concrete Association.

**Jones A. (1999)** An Affordable Safety Barrier for Nepal. *Highways and Transportation*. Institution of Highways and Transportation, London. Vol. 46(3), pp. 15-21.

**Jones A.P. y Jorgensen S.H. (2003)** The use of multilevel models for the prediction of road accident outcomes. *Accident Analysis & Prevention*. Vol. 35, No. 1, pp. 59-69.

**Kamal, M. (1970)** Analysis and simulation of vehicle to barrier impact. SAE Technical Paper No. 700414.

**Kammel C. (2007)** Safety barrier performance predicted by multi-body dynamics simulation. *International Journal of Crashworthiness*, vol. 12, No. 2, pp. 115-125.

**Kayir H. y Weiss W. J. (2002)** A fundamental look at settlement in fresh systems: role of mixing time and high-range water reducers. First North American Conference on Self-Consolidating Concrete, Chicago, Illinois, pp. 27-32.

**Khalil T. y Du Bois P. (2004)** Vehicle crashworthiness and occupant protection: Finite element analytical techniques and applications to structural design, pp. 111-158. Automotive Applications Committee, American Iron and Steel Institute, Southfield, Michigan.

**Khatib Z.K. y Bayomy F.M. (1999)** Rubberized portland cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 206-213.

**Kuppa S. (2004)** Injury Criteria for Side Impact Dummies. National Transportation Biomechanics Research Centre, NHTSA. May 2004.

**Kusama, R. (2004)** Study on numerical collision analysis for performance-based design of guard fences. Master thesis, Dept. of Civil Engineering, Nagoya University, Nagoya, Japan.

**Leonardi S. y Pappalardo G. (2000)** Analisi critica delle caratteristiche prestazionali delle barriere di sicurezza. Quaderno n. 110, luglio 2000. Istituto di strade ferrovie aeroporti, Catania.

**Liaw J.C., Walten A.C. y Brown J.C. (1990)** Structural impact simulation using program KRASH. SAE Technical Paper No 900466.

**Lim G.G. y Paluszny A. (1988)** Side Impact Research. XXII Fisita Congress- SAE Publication P-211, Paper No. 885055, Sept. 1988.

**Liu X., Ye G., De Schutter G., Yuan Y. y Taerwe L. (2008)** On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 4, pp. 487-499.

**Lokken E.C. (1971)** Concrete median barrier safely redirects impacting cars. *Civil Engineering ASCE*, Oct. 1971, Vol. 41, No. 10, pp. 77-80.

**López J. (2011)** Las ventajas de la barrera metálica portátil frente al tradicional hormigón. *Cimbra*, núm. 392 pp. 30-35.

**Lui K.J., Mc Gee, D. Rhodes, P. y Pollock D. (1988)** An application of conditional logistic regression to study the effects of safety belts, principal impact points, and car weights on driver's fatalities. *Journal of Safety Research*. Vol. 19, No. 4, pp. 197-203.

**MADYMO (1999)** MADYMO User's Manual 3D, Version 5.4. TNO Road Vehicles Research Institute. The Netherlands.

**Magee, C.L. (1988)** Design for crash energy management: present and future developments. The Seventh International Conference on Vehicle Structural Mechanics, April 1988.

**Mahmood H.B. y Fileta B.B. (2004)** Vehicle crashworthiness and occupant protection: Design of vehicle structures for crash energy management, pp. 11-110. Automotive Applications Committee, American Iron and Steel Institute, Southfield, Michigan.

**Mak K.K. y Sicking D.L. (1990)** Rollover caused by concrete safety-shaped barriers. *Transportation Research Record*. No. 1258. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington DC.

**MASH (2009)** Manual for Assessing Safety Hardware, First Edition. AASHTO.

**McDevitt C. (2000)** Basics of concrete barriers. *Public Roads*. Vol. 63 No. 5. March/April, 2000. Federal Highway Administration.

**McIvor, I.K. (1973)** Modeling and simulation as applied to vehicle structures and interiors. Vehicle Safety Research Integration Symposium. U.S. Department of Transportation, May 1973.

**Mena F. (2015)** Características estructurales del hormigón con árido reciclado mixto reforzado con fibras. Tesis Doctoral. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya.

**Michie J.D., Calcote L.R. y Bronstad M.E. (1971)** Guardrail Performance and Design. NCHRP Report 115. Transportation Research Board, Washington DC.

**Murray Y.D. (2007)** User's manual for LS-DYNA concrete material model 159. Report No FHWA-HRT-05-062. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.

**Naaman A.E. (2003)** Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol.1, No. 3, pp. 241-252.

**Naaman A.E., Wongtanakitcharoen T. y Hauser G. (2005)** Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete *ACI Materials Journal*, Vol. 102, No. 1, pp. 49-58.

**Naing C.L., Hill J., Thomson R., Fagerlind H., Kelkka M., Klootwijk C., Dupre G. y Bisson O. (2008)** Single-vehicle collisions in Europe: analysis using real-world and crash-test data. *International Journal of Crashworthiness*. Vol. 13, No. 2, pp. 219-229.

**NCHRP 350 (1993)** Recommended procedures for the safety performance evaluation of highway features. Transportation Research Board - National Research Council.

**Nehdi M. y Khan A. (2001)** Cementitious composites containing recycled tire rubber: an overview of engineering properties and potential applications. *Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP*, Vol. 23, No. 1, pp. 3-10.

**Noel J.S., Hirsch T. J., Buth C.E. y Arnold A. (1981)** Loads on Bridge Railings. *Transportation Research Record 796*, pp. 31–35. Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.

**Obiol A. (1978)** Cálculo de placas por los métodos de rotura. Barcelona, 1978.

**Olson R.M., Post E.R. y McFarland W.F. (1970)** Tentative service requirements for bridge rail systems. NCHRP Report 86.

**Orden Circular 35/2014 (2014)** Criterios de aplicación de sistemas de contención de vehículos. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

**Parapinski A. C. (2013)** Caracterización de las propiedades del hormigón autocompactante asociadas al esqueleto granular. Tesis Doctoral. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya.

**Pawlus W., Karimi H.R. y Robbersmyr K.G. (2012)** Reconstruction and simulation of the vehicle to road safety barrier oblique collision based on the Levenberg - Marquardt algorithm. *International Journal of Crashworthiness*. Vol. 17, No. 6, pp. 676-692.

**Pease B.J., Hossain A.B. y Weiss W.J. (2004)** Quantifying volume change, stress development, and cracking due to self-desiccation. *ACI SP-220: Autogenous deformation of concrete*, pp. 23-39.

**PG-3 (2014)** Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. Artículo 704: Barreras de seguridad, pretilas y sistemas para protección de motociclistas. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

**Powell G.H. (1973)** Barrier VII: A computer program for evaluation of automobile barrier systems. Report No FHWA-73-51. Federal Highway Administration, Washington DC.

**Powers T.C. (1968)** The Properties of Fresh Concrete. John Wiley & Sons, New York.

**Pujadas P. (2013)** Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas. Tesis Doctoral. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya.

**Qi C. (2003)** Plastic shrinkage cracking mitigation using blended fiber reinforcement. Thesis Doctoral. Purdue University, Indiana, USA.

**Qi C., Weiss W.J. y Olek J. (2003)** Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber-reinforced concrete using semi-automated image analysis. *Concrete Science and Engineering*. Vol. 36, No 260, pp. 386–395.

**Qi C., Weiss W.S. y Olek J. (2005)** Statistical significance of the restrained slab test for quantifying plastic cracking in fiber reinforced concrete. *Journal of ASTM International*, vol. 2, July 2005.

**Ray M.H. (1997)** The use of finite element analysis in roadside hardware design. *International Journal of Crashworthiness*. Vol. 2, No. 4, pp. 333-348.

**Ray M.H. y McGinnis R.G. (1997)** Guardrail and median barrier crashworthiness. NCHRP Synthesis 244. A Synthesis of Highway Practice, Transportation Research Board / National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.

**Ray M.H., Mongiardini M., Atahan A.O., Plaxico C.A. y Anghileri M. (2007)** Recommended procedures for verification and validation of computer simulations used for roadside safety applications. NCHRP Project 22-24. Interim Report.

**Ray M.H., Plaxico C.A. y Anghileri M. (2009)** Recommended procedures for verification and validation of computer simulations used for roadside safety applications. NCHRP 22-24, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, 2009.

**Ray M.H. y Carrigan C. E. (2013)** Recommended Guidelines for the Selection of Test Levels 2 through 5 Bridge Railings. NCHRP 22-12(03).

**Ren L. (2013)** Les dispositifs de retenue en béton: sûrs et durables. Infrastructure, avril 2013. FEBELCEM, Fédération de l'industrie cimentière belge. Bruxelles, Belgium.

**RECO (1995)** Crash Testing of a Precast Traffic Barrier Atop a Reinforced Earth Wall. Technical Bulletin: MSE-8, The Reinforced Earth Company.

**Segal D.J. (1976)** Highway vehicle object simulation model. Report No FHWA-RD-76-163. Federal Highway Administration, Washington DC.

- Shojaati M. y Schüler W. (1999)** ASI – Messmethode. Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik (IVT), Strassen und Eisenbahnbau.
- Shojaati M. (2003)** Correlation between injury risk and impact severity index ASI. 3rd Swiss Transport Research Conference Monte Verità / Ascona, March 19 -21, 2003.
- Sicking D.L. y Ross H.E. (1985)** Roadside concrete barriers: warrants and end treatment. Research Report 346-1F. Texas Transportation Institute A&M University System College Station, Texas.
- Soroushian P., Mirza F. y Alhozaimy A. (1995)** Plastic shrinkage cracking of poly-propylene fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 5, pp. 553–560.
- Soutsos M.N., Le T.T. y Lampropoulos A.P. (2012)** Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, Vol. 36, 11.2012, pp. 704-710.
- Sturt R. y Fell C. (2009)** The relationship of injury risk to accident severity in impacts with roadside barriers. *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 14, No. 2, pp. 162-172.
- Sun Y., Rong J. y Tai Y. (2012)** Analysis of collisions of vehicle and concrete barrier on rural highways. *Advanced Materials Research*, Vol. 415-417, pp. 2304-2307.
- Terry P.E. y Tholen M. (2006)** Security barrier design. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 11, No. 2, pp. 105-111.
- Topçu I.B. y Avcular N. (1997)** Collision behaviours of rubberized concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 12, pp. 1893-1898.
- Transportation Research Circular E-C107 (2006)** Control of cracking in concrete. Transportation Research Board, Washington DC.
- Troutbeck R.J., Barker T. y Thambiratnam D. (2001)** Roadside barrier design and vehicle occupant safety. Australian Transport Safety Bureau Road Safety Research Grant Final Report No T2000/0736. School of Civil Engineering, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.
- Turner M., Clough R.W., Martin H.C. y Topp L.J. (1956)** Stiffness and deflection analysis of complex structures. *Journal Aeronautical Science*, 23 (9), pp. 805-823.
- United States Air Force (1967)** US Military Specification. General Specification for Seat System: Upward Ejection, Aircraft. MIL-S-9479A.
- Weiss W.J. (1999)** Prediction of early-age shrinkage cracking in concrete. Ph.D. dissertation, Northwestern University, Evanston, Illinois.

**Welch R.E. y Pang E. (1984)** Validation and application of the guard computer program. Unpublished report for project DOT-FH-11-9460, Chiapetta, Welch and Associates, Palos Hills, IL, 1984.

**Weyers R. E., Conway J.C. y Cady P.D. (1982)** Photoelastic Analysis of Rigid Inclusions in Fresh Concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 12, pp. 475–484.

**Whirley R.G. y Englemann B.E. (1993)** Nonlinear explicit three-dimensional finite element code for solid and structural mechanics user's manual. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.

**Whitworth H. A., Bendidi R., Marzougui D. y Reiss R. (2004)** Finite element modeling of the crash performance of roadside barriers. *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 9, No. 1 pp. 35-43.

**Wu W. y Thomson R. (2004)** Compatibility between passenger vehicles and road barriers during oblique collisions. *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 9, No. 3, pp. 245-253.

**Yan G. (2009)** Application of reactive powder concrete in highway barriers. International Conference on Transportation Engineering 2009, Volume Two. Proceedings of the second international conference, pp. 1232-1237.

**Yan S. (2012)** Impact analysis of single slope concrete barrier. *Journal of Beijing University of Technology*, Vol. 38, No. 4, pp. 1-10.

**Yonten K., Manzri M.T., Marzougui D. y Eskandarian A (2005)** An assessment of constitutive models of concrete in the crashworthiness simulation of roadside safety structures. *International Journal of Crashworthiness*. Vol. 10, No. 1, pp. 5-19.





## ANEJO 1

### Información de normativas

#### A1.1.- Norma EN 1317 (2010)

Ensayo	Velocidad de impacto [km/h]	Ángulo de impacto (°)	Masa total del vehículo [kg]	Tipo de vehículo
TB11	100	20	900	Turismo
TB21	80	8	1300	Turismo
TB22	80	15	1300	Turismo
TB31	80	20	1500	Turismo
TB32	110	20	1500	Turismo
TB41	70	8	10000	Camión
TB42	70	15	10000	Camión
TB51	70	20	13000	Autocar
TB61	80	20	16000	Camión
TB71	65	20	30000	Camión
TB81	65	20	38000	Camión articulado

Tabla A1.1.. Tipos de ensayos de impacto.

Tipo de contención	Nivel de contención	Ensayos
Baja	T1	TB21
	T2	TB22
	T3	TB41 + TB21
Normal	N1	TB31
	N2	TB32 + TB11
Alta	H1	TB41 + TB11
	H2	TB51 + TB11
	H3	TB61 + TB11
Muy alta	H4a	TB71 + TB11
	H4b	TB81 + TB11

Tabla A1.2. Tipos de nivel de contención.

Niveles de anchura de trabajo	Anchura de trabajo W (m)
W1	$W \leq 0,6$
W2	$0,6 < W \leq 0,8$
W3	$0,8 < W \leq 1,0$
W4	$1,0 < W \leq 1,3$
W5	$1,3 < W \leq 1,7$
W6	$1,7 < W \leq 2,1$
W7	$2,1 < W \leq 2,5$
W8	$2,5 < W \leq 3,5$

Tabla A1.3. Niveles según la anchura de trabajo.

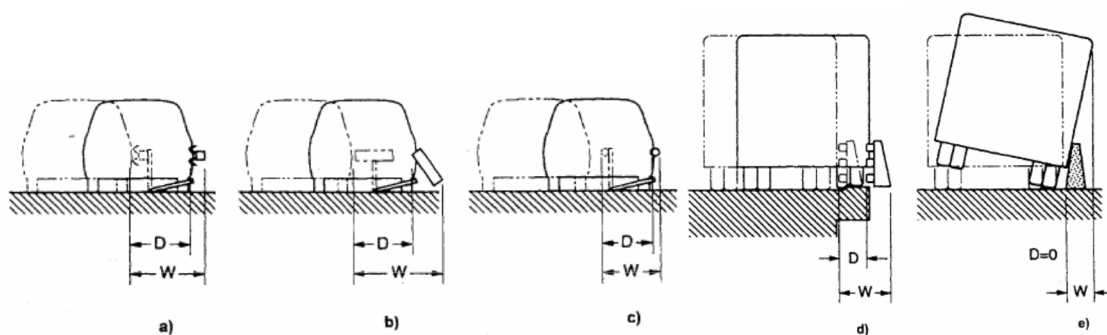


Figura A1.1. Deflexión dinámica (D) y anchura de trabajo (W).

### A1.2.- Orden Circular 35/2014

*Riesgo de accidente	IMD e $IMD_p$ por sentido	Nivel de contención
Muy grave	$IMD_p \geq 5000$	H3 – H4b
	$5000 > IMD_p \geq 2000$	H2 – H3
	$2000 > IMD_p$	H2
Grave	$IMD \geq 10000$	H1 – H2
	$IMD_p \geq 2000$	H2
	$2000 > IMD_p \geq 400$	H1
	$400 > IMD_p$	N2 – H1
Normal	$IMD_p \geq 2000$	H1
	$2000 > IMD_p \geq 400$	N2 – H1
	$400 > IMD_p$	N2
	$50 > IMD_p$ y $V_p \leq 80$ Km/h	N1 – N2

IMD es la Intensidad Media diaria de la vía,  $IMD_p$  la Intensidad Media Diaria por sentido,  $V_p$  es la velocidad de proyecto  
 \*Definición del riesgo de accidente según Apartado 2.2 “Criterios de instalación” del Capítulo 2 de la Orden Circular 35/2014

Tabla A1.4. Selección del nivel de contención recomendado para sistemas de contención de vehículos según el riesgo de accidente.

### A1.3.- NCHRP 350 / MASH

Factores de evaluación	Criterio de evaluación	Ensayos aplicables <sup>a</sup>
Adecuación estructural	A. El sistema de contención debe contener y redirigir el vehículo. El vehículo no debe penetrar ni rebasar el sistema a pesar de que la deflexión lateral controlada sea aceptable.	10, 11, 12, 20, 21, 22, 35, 36, 37, 38
	B. El sistema debe activarse de manera predecible en el modo de rotura, fractura o de cese.	60, 61, 70, 71, 80, 81
	C. Un comportamiento aceptable del sistema es redirigir, penetración controlada o para de forma controlada el vehículo.	30, 31, 32, 33, 34, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 50, 51, 52, 53

<sup>a</sup> Los números referidos a los ensayos corresponden al número de ensayo de designación según el nivel de contención a menos que se diga lo contrario.

*Tabla A1.5.a. Guía de evaluación de seguridad (Tabla 5.1 de la NCHRP 350).*

Factores de evaluación	Criterio de evaluación	Ensayos aplicables <sup>a</sup>
Trayectoria del vehículo	K. Después de la colisión es preferible que la trayectoria del vehículo no invada carriles adyacentes de tráfico.	Todos
	L. La OIV en el sentido longitudinal no debe exceder de 12 m/s y la ORA en el mismo sentido longitudinal no debe exceder de 20g (Ver Apéndice A, Sección A5.3 del procedimiento de cálculo).	11, 21, 35, 37, 38, 39
	M. El ángulo éxito después del impacto preferiblemente debe ser menor al 60% del ángulo de impacto, medido en el instante en que el vehículo pierde el contacto con el sistema de contención.	10, 11, 12, 20, 21, 22, 35, 36, 37, 38, 39
	N. La trayectoria del vehículo es aceptable de acuerdo al ensayo.	30, 31, 32, 33, 34, 39, 42, 43, 44, 60, 61, 70, 71, 80, 81

<sup>a</sup> Los números referidos a los ensayos corresponden al número de ensayo de designación según el nivel de contención a menos que se diga lo contrario.

*Tabla A1.5.b. Guía de evaluación de seguridad (Tabla 5.1 de la NCHRP 350).*

Factores de evaluación	Criterio de evaluación			Ensayos aplicables <sup>a</sup>
Riesgo de los ocupantes	D. Elementos sueltos, fragmentos u otros escombros procedentes del ensayo del sistema no deben penetrar o ser potenciales para penetrar al compartimento del ocupante, o de personal en zona de obras. Deformaciones o intrusiones en el interior del compartimento del ocupante que pueden causar lesiones serias no deben ser permitidas. Ver discusión Sección 5.3 y Apéndice E.			Todos
	E. Elementos sueltos, fragmentos u otros escombros procedentes del ensayo del sistema o daños al vehículo no tienen que bloquear la visión del conductor o de otra manera causar que el conductor pierda el control del vehículo.			70, 71
	F. El vehículo debe permanecer en vertical durante y después de la colisión con moderados valores de rotación aceptables.			Todos excepto aquellos en el listado G
	G. Es preferible, todo y que no esencial, que el vehículo permanezca en vertical durante y después de la colisión.			12, 22, 30 <sup>b</sup> , 31 <sup>b</sup> , 32 <sup>b</sup> , 33 <sup>b</sup> , 34 <sup>b</sup> , 35 <sup>b</sup> , 36 <sup>b</sup> , 37 <sup>b</sup> , 38 <sup>b</sup> , 39 <sup>b</sup> , 40 <sup>b</sup> , 41 <sup>b</sup> , 42 <sup>b</sup> , 43 <sup>b</sup> , 44 <sup>b</sup>
	H. Velocidades de impacto (ver Apéndice Sección A5.3 para calcular procedimiento) que deberían satisfacer lo siguiente:			
	Velocidades límites de impacto (m/s).			
	Componente	Preferido	Máximo	
	Longitudinal y lateral	9	12	10, 20, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 40, 41, 42, 43, 50, 51, 52, 53, 80, 81
	Longitudinal	3	5	60, 61, 70, 71
	I. Aceleraciones del ocupante (ver Apéndice Sección A5.3 para calcular procedimiento) que deberían satisfacer lo siguiente:			
	Aceleraciones límites del ocupante.			
	Componente	Preferido	Máximo	
Longitudinal y lateral	15	20	10, 20, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 40, 41, 42, 43, 50, 51, 52, 53, 60, 61, 70, 71 80, 81	
J. (Opcional) Dummy Híbrido III. Respuesta que debe conformarse por el criterio de evaluación 571.208 Título 49 del Código Federal de Regulación, Capítulo V (Edición 10-1-88). Ver Sección 5.3 las limitaciones del dummy Híbrido III.			10, 20, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 40, 41, 42, 43, 50, 51, 52, 53, 60, 61, 70, 71 80, 81	

<sup>a</sup> Los números referidos a los ensayos corresponden al número de ensayo de designación según el nivel de contención a menos que se diga lo contrario. <sup>b</sup> Solo por el ensayo nivel 1.

Tabla A1.5.c. Guía de evaluación de seguridad (Tabla 5.1 de la NCHRP 350).

Técnica	Principal area de aplicación	Posibles limitaciones
1. Métodos de diseño estructural	<p>Diseño preliminar y final del sistema de contención para un rendimiento medio y no de colisión.</p> <p>Diseño preliminar del sistema de contención para un rendimiento colisión de vehículos.</p> <p>Análisis de conexiones, propiedades requeridas del material y diseño de la cimentación.</p>	<p>Características dinámicas y cinemáticas y colisión del vehículo no son correspondidas.</p> <p>Severidad de impacto en términos de lesiones y fatalidades no son adecuadas.</p>
2. Ensayos estáticos (cuasi estáticos)	<p>Determinar las propiedades mecánicas de los materiales.</p> <p>Validación del diseño estructural del sistema de contención.</p> <p>Control de calidad de las propiedades críticas del material.</p> <p>Desarrollo de los valores <i>inputs</i> para programas de ordenador.</p>	<p>Propiedades dinámicas no examinadas.</p> <p>Generalmente aplicable para muestras, conectores y pequeños subconjuntos; no aplicables para todo el sistema de contención.</p>
3. Simulaciones por ordenador	<p>Estudio de las principales interrelaciones dinámicas y cinemáticas del vehículo.</p> <p>Estudio de las interrelaciones dinámicas del vehículo y del ocupante.</p> <p>Estudio de sensibilidad del sistema, del vehículo y las condiciones de contorno del ensayo.</p>	<p>El programa debe ser validado por ensayos a escala real.</p> <p>Los valores <i>input</i> no son siempre conocidos y se debe estimar.</p> <p>Los modelos de vehículo/sistema de contención de los programas de ordenador simulación suelen ser únicos.</p>

*Tabla A1.6.a. Aplicaciones y limitaciones de diferentes técnicas para el diseño de un sistema de contención (Tabla D-3 de la NCHRP 350).*

Técnica	Principal area de aplicación	Posibles limitaciones
4. Ensayos dinámicos de laboratorio  A. Péndulo gravitatorio	Evaluación de mecanismos de rotura.  Propiedades de fuerza y deformación de guardarail, interacción poste/cimentación.  Tensión dinámica de los sistemas de anclaje.  Propiedades dinámicas de subsistemas de barrera.	Velocidades de impacto de 40 Km/h o menores.  Para soporte con poste, mecanismo de bisagra no examinado.  No simula impactos descentrados.  Trayectoria del sistema no reproducido.  Flexión en el soporte de la base no aplicable.  La deformación debe ser prevista para el tipo y el grosor del sistema y recalibrado.  No puede evaluar adecuadamente el criterio D de la Tabla 5.1 de la NCHRP 350.
B. Lanzamiento de una masa	Ensayo de control de calidad de rotura.  Ensayo que puede realizarse en un espacio interior confinado.	Mismas limitaciones que el ensayo del péndulo.  Por rotura en la base, fijar el poste (parte superior).
C. Ensayo a escala	Desarrollo del sistema.	Dificultades e incertidumbre en el modelado del vehículo y del sistema de contención.
D. Ensayo de impacto con vehículo <i>boggie</i>	Ensayo de cumplimiento para uno o múltiples soportes en la base de un sistema de contención.  Ensayo repetible.  Bajo coste.  Alto rango de velocidades de impacto (0 - 60mph (97 Km/h)).	Se debe ser cuidadoso en designar y calibrar las características representativas del vehículo, a menudo son procesos caros.  Los diseño debe ser apropiados para el ensayo con solo variaciones en las limitaciones del sistema de contención.  Debe ser actualizado y recalibrado periódicamente.
E. Ensayo de impacto con vehículo	Ensayo de cumplimiento con todas las características y parámetros a cumplir.  Investigación con condiciones inusuales.  Reproducir impactos de carreteras.  Ensayo prueba final.	Relativamente es caro reproducirlo.  Requiere de amplias instalaciones condicionadas para el ensayo.  Ensayo lento para llevarlo a cabo.  Los resultados del ensayo pertenecen a un modelo específico de vehículo y no es aplicable a otros vehículos.

*Tabla A1.6.b. Aplicaciones y limitaciones de diferentes técnicas para el diseño de un sistema de contención (Tabla D-3 de la NCHRP 350).*





## ANEJO 2

# Estudio previo de dosificaciones anteriores

### A2.1.- Dosificaciones realizadas en experiencias previas

Las dosificaciones siguientes corresponden a hormigones deslizados diseñados fruto del estudio y la experiencia realizada entre la Universitat Politècnica de Catalunya y la empresa constructora Servià Cantó en los años 2004 y 2009. En base a los resultados de los estudios que se realizaron, se extraen las principales conclusiones junto con la Tabla A2.1 de las dosificaciones estudiadas.

#### Dosificaciones 1D, 2D y 3D

Empleo de cemento tipo I, con clase resistente 42,5 R o incluso superior si es necesario, 52,5R.

La velocidad de avance del sistema ha de ser alta (importancia del tiempo de fraguado).

Para reducir costes, mirar de reducir la proporción de cemento aumentando la proporción de árido fino y la utilización de aditivos superplastificantes (más económicos que el cemento).

Es importante mantener la proporción del árido fino en un 58% y la gruesa en un 42% aproximadamente. El empleo de un alto contenido de finos resulta imprescindible de cara a conseguir una alta trabajabilidad (para la facilidad de moldeo) y una buena cohesión. De hecho, es básicamente el árido fino quien proporciona la trabajabilidad en el hormigón deslizado, pues el porcentaje de pasta medio obtenido, del 22%, resulta bajo para cumplir con este objetivo.

Por último, destacar el uso de los aditivos aireantes, que contribuye a lubricar la mezcla para que deslice mejor, y el empleo de aditivos plastificantes y superplastificantes, imprescindibles de cara a reducir la demanda de agua originada por el alto contenido de finos, que resultaría en una consistencia inadecuada para conseguir una mezcla que no se desmorone.

Fuente	García (2004)			Casas (2009)					
	-	-	-	C-17 salida 132	C-17 (Tona) 100 m	C-17 (Tona) 200 m	C-17 (Tona) 50 m	C-17 (Tona) 50 m	C-17 (Tona) 50 m
Tramo de barrera	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dosificación	1D	2D	3D	4D	5D	6D	7D	8D	9D
Arena 0-6	1100	1100	990	1050	910 (0-3)	900 (0-3)	900 (0-3)	900 (0-3)	900 (0-3)
Grava 6-12	900	900	-	200	200	200	200	200	200
Grava 12-20	-	-	810 (12/18)	600	850 (20/25)	850 (20/25)	850 (20/25)	850 (20/25)	830 (20/25)
Cemento CEM I 42,5 R	340	340	300	340	350	350	300	350	350
Aireante (l/m <sup>3</sup> )	0,5	0,5	-	1,5	1,1	0,75	0,75	0,75	0,75
Plastificante (l/m <sup>3</sup> )	2,03	2,03	1	1,75	2	2	2	2	2
Agua (l/m <sup>3</sup> )	150	150	140	150	74	114	114	114	114
Relación a/c	0,44	0,44	0,47	0,44	0,21	0,33	0,38	0,33	0,33
Filler (Kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	-	-	50	-	-
Fibras plásticas (Kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	-	-	-	0,6	-
Fibras de acero (Kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	-	-	-	-	15
Cono de Abrams	-	-	-	-	-	20	20	-	-

Tabla A2.1. Dosificaciones de hormigón deslizado en barreras de hormigón.

#### Dosificaciones 4D y 5D:

La dosificación 4D generó una buena fluidez y un buen extrusionado. Pero una vez construida la barrera presentó una alta frecuencia de fisuras desde 50 cm a varios metros, algunas de ellas del grosor de varios mm.

La dosificación 5D generó una buena fluidez y un buen extrusionado. Pero una vez construida la barrera presentaba muchas coqueas y la aparición de burbujas de aire en la superficie.

La barrera con la dosificación 5D presentó una menor fisuración que la barrera con 4D.

#### Dosificaciones 6D, 7D, 8D y 9D:

Los tramos de barrera con las dosificaciones 7D, 8D y 9D presentan menor fisuración que la dosificación base de referencia 6D.

La 7D es la dosificación que presenta unas mejores resultados tanto en estado fresco con una buena trabajabilidad y buena extrusión, como el endurecido con una frecuencia muy baja de fisuras.

Las dosificaciones 8D y 9D también son dos buenas opciones pero la 9D con fibras de acero presentó problemas de trabajabilidad y ejecución de la barrera. Si se quieren usar fibras de acero es idóneo usar fibras de menor longitud.



## ANEJO 3

# Cálculo fuerza de impacto

### A3.1.- Normativas e instrucciones oficiales

En base a la Tabla 2.8 como resumen del cálculo de la carga de impacto, se presenta a continuación de forma extendida las apreciaciones oportunas que se deben tener en cuenta para el cálculo.

#### A3.1.1- CTE. Documento Básico. SE-AE. Seguridad Estructural Acciones en la edificación

##### Caso de impacto

##### Generalidades

1. Las acciones sobre un edificio causadas por un impacto dependen de la masa, de la geometría y de la velocidad del cuerpo impactante, así como de la capacidad de deformación y de amortiguamiento tanto del cuerpo como del elemento contra el que impacta.
2. Salvo que se adoptaren medidas de protección, cuya eficacia debe verificarse, con el fin de disminuir la probabilidad de ocurrencia de un impacto o de atenuar sus consecuencias en caso de producirse, los elementos resistentes afectados por un

impacto deben dimensionarse teniendo en cuenta las acciones debidas al mismo, con el fin de alcanzar una seguridad estructural adecuada.

3. El impacto de un cuerpo sobre un edificio puede representarse mediante una fuerza estática equivalente que tenga en cuenta los parámetros mencionados.
4. Este Documento Básico considera sólo las acciones debidas a impactos accidentales, quedando excluidos los premeditados, tales como la del impacto de un vehículo o la caída del contrapeso de un aparato elevador.

#### Impacto de vehículos

1. La acción de impacto de vehículos desde el exterior del edificio, se considerará donde y cuando lo establezca la ordenanza municipal. El impacto desde el interior debe considerarse en todas las zonas cuyo uso suponga la circulación de vehículos.
2. Los valores de cálculo de las fuerzas estáticas equivalentes debidas al impacto de vehículos de hasta 30 kN de peso total, son de 50 kN en la dirección paralela la vía y de 25 kN en la dirección perpendicular, no actuando simultáneamente.
3. La fuerza equivalente de impacto se considerará actuando en un plano horizontal y se aplicará sobre una superficie rectangular de 0,25 m de altura y una anchura de 1,5 m, o la anchura del elemento si es menor, y a una altura de 0,6 m por encima del nivel de rodadura, en el caso de elementos verticales, o la altura del elemento, si es menor que 1,8 m en los horizontales.

#### **A3.1.2- Eurocódigo 1. Parte 1.1. Acciones Generales. Anexo B (EN 1991-1-1:2002)**

Para muros y pretilas en aparcamientos, la fuerza horizontal  $F$  (kN) que debe soportar una barrera resistente al choque de un vehículo, viene dada por la expresión:

$$F = 0,5 \cdot M \cdot \frac{v^2}{\delta_c + D_r} \quad [\text{Ec. A3.1}]$$

Donde,  $M$  es la masa del vehículo (Kg),  $v$  es la velocidad inicial (m/s) normal a la barrera,  $\delta_c$  es la deformación del vehículo (mm) y  $D_r$  es la deformación de la barrera (mm).

El código también incluye unos valores orientativos para la expresión:

$$v = 4,5 \frac{m}{s} = 16,2 \frac{Km}{h} ; \delta_c = 100 \text{ mm}$$

Para vehículos inferiores a 2.500 Kg se recomienda dimensionar para una masa igual a 1.500 Kg. Si se trata de una barrera totalmente rígida con  $D_r = 0$  mm, se toma el valor de 150 kN como fuerza de impacto para vehículos por debajo de los 2.500 Kg. El modo de aplicación de la carga deberá ser uniformemente repartida en una longitud de 1,5 m de barrera y perpendicular

a ésta a la altura del parachoques (para vehículos inferiores a 2.500 Kg se puede tomarse a 375 mm desde el nivel del suelo).

### A3.1.3- Eurocódigo 1. Parte 1.7. Acciones Accidentales (EN 1991-1-7:2006)

Para fuerzas de colisión en pilas y elementos portantes se dimensiona una carga estática equivalente de 500 kN a una altura de aplicación de 1,25m. En el anejo C del mismo documento se define mediante la siguiente expresión el valor de fuerza de impacto para cargas dinámicas como el impacto de vehículos.

$$F = v \cdot \sqrt{K \cdot M} \quad [\text{Ec. A3.2}]$$

Donde  $v$  es la velocidad de impacto (m/s),  $M$  es la masa del vehículo en Kg y  $K$  es la rigidez lineal del vehículo. En esta fórmula se supone que el sistema de contención es totalmente rígido y que el vehículo se deforma de manera lineal durante el choque. Un valor orientativo de la rigidez del vehículo que facilita la norma es de 300 kN/m.

Fuera de la normativa, el estudio realizado por Nolan et al. (2001) muestra una lista de rigideces lineales de más de 80 modelos de vehículos distintos para poder implementar en el cálculo de la fuerza de impacto en la fórmula del Eurocódigo 1. En el artículo de Guy et al. (2004) explica detalladamente el modo de obtención de esta rigidez lineal. Un modelo alternativo de cálculo para la rigidez lineal de un vehículo es el presentado por Wood et al. (1993), donde determina un patrón común de fallo en la gráfica de fuerza - deformación de un vehículo.

### A3.1.4- Eurocódigo 1. Parte 2: Acciones de tráfico en puentes (EN 1991-2:2003)

En el capítulo 4.7.3.3. Cargas de colisión en sistemas de contención de vehículos, se da una tabla con un valor de fuerzas horizontales para cada clase, habiendo 4 clases de la A hasta la D. Los criterios de utilización de cada clase serán definidos por cada país en su Anejo correspondiente.

Clase	Fuerza horizontal (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Tabla A3.1. Fuerza a aplicar para cada clase de contención según EC1 Parte 2.

Esta fuerza se aplicará transversalmente a la barrera y en una longitud de 0,5 m. La altura se determinará como la menor de 1 m sobre la base de la barrera o 0,10 m bajo la coronación de ésta.



Estos valores se consiguen experimentalmente en ensayos de impacto (*crash test*). No hay una correlación directa entre la clase recomendada y el tipo de barrera de contención. Los valores propuestos dependen especialmente de la rigidez de la conexión entre la barrera y la plataforma del puente. Conexiones rígidas nos dan clase D y conexiones flexibles nos dan clase A. Normalmente las conexiones flexibles se utilizan para barreras flexibles, como las de acero, para un nivel de contención H2.

Además de esto, se ha de asegurar que la parte de la estructura que soporta la barrera (la unión barrera-plataforma) tenga una resistencia 1,25 veces la resistencia de la propia de la barrera, así se asegura que no romperá por la unión.

### A3.1.5- Eurocódigo 1. Parte 1.7 Acciones accidentales (EN 1991-1-7:2006)

Para estructuras en las que la energía es absorbida fundamentalmente por el vehículo que impacta (barreras rígidas), la fuerza equivalente se puede calcular del lado de la seguridad como:

Categoría de tráfico	Fuerza estática equivalente de diseño (kN)
Autovías, vías nacionales y principales	500
Vías en zonas rurales	375
Vías en área urbanas	250
Estacionamiento y garajes	75

Tabla A3.2. Fuerza estática equivalente a utilizar según EC1 Parte 1.7.

Las fuerzas de colisión se suponen actuando a 1,25 m sobre el nivel de la superficie de rodadura (0,5 m para turismos). El área de aplicación de la fuerza tiene una altura de 0,25m o el ancho del elemento, el que resulte menor.

### A3.1.6- IAP-11. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera

Para impactos de vehículos de carretera contra elementos estructurales del puente se dimensionará una carga de impacto de 500 kN en la dirección perpendicular al tráfico. Esta carga se aplicará superficialmente con unas medidas de 0,5 m en vertical y 1,5 m en horizontal a la altura más desfavorable entre 0,5 m y 1,5 m.

Para impactos de vehículos contra sistemas de contención, la carga producida ha de ser mayor a las medidas realizadas durante los ensayos de impacto definidos por la norma UNE-EN 1317. El fabricante de dichos sistemas facilitará el valor nominal de las fuerzas y momentos máximos que se transmiten a la estructura del puente. Cuando no se conozca dicha información se tomará el valor característico de la resistencia del anclaje de la barrera.

### A3.1.6- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2012) (Especificaciones de diseño para puentes)

En esta guía de especificaciones para el diseño de puentes de la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Transportes Oficiales (*The American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO*) determina la carga de impacto de diseño de una barrera según el nivel de contención. En el capítulo 2 de esta tesis se han descrito los 6 niveles de contención y los equivalentes a la normativa europea EN 1317.

En la tabla A3.3 se presenta el valor de carga de impacto transversal ( $F_v$ ), el valor de carga de impacto longitudinal ( $F_L$ ) la longitud de aplicación ( $L_a$ ) ya que la carga de impacto se aplica linealmente y la altura de aplicación ( $H_a$ ).

Parámetros	Nomenclatura	Unidades	Nivel de contención					
			TL-1	TL-2	TL-3	TL-4	TL-5	TL-6
Fuerza Transversal	$F_t$	kN	60.1	120.1	240.2	240.2	551.6	778.4
Fuerza Longitudinal	$F_L$	kN	20.0	40.0	80.1	80.1	182.4	258.0
Fuerza Vertical	$F_v$	kN	20.0	20.0	20.0	80.1	355.9	355.9
Longitud de aplicación $F_t$	$L_t$	m	1.22	1.22	1.22	1.07	2.44	2.44
Longitud de aplicación $F_L$	$L_L$	m	1.22	1.22	1.22	1.07	2.44	2.44
Longitud de aplicación $F_v$	$L_v$	m	5.49	5.49	5.49	5.49	12.19	12.19
He (m)	$H_e$	m	0.46	0.51	0.61	0.81	1.07	1.42
Altura mínima de rail	H	m	0.69	0.69	0.69	0.81	1.07	2.29

Tabla A3.3. Diseño de fuerzas para barreras de tráfico.

(Fuente: Tabla A13.2-1. *Design Forces for Traffic Railings, AAHSTO, 2012*)

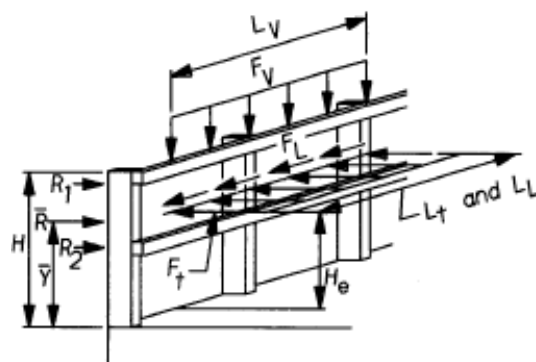


Figura A3.1. Aplicación de los parámetros para el diseño de fuerzas para barreras de tráfico.

### A3.1.7- Método de Olson, Post y McFarland expuesto en la NCHRP 86 (1970)

En base en los principios de dinámica y de equilibrio energético y de observaciones de ensayos de impacto, Olson et al. (1970) desarrollaron un método para determinar el valor de impacto de un vehículo contra una barrera. Este método se basa en las siguientes hipótesis:

- Se desprecian las aceleraciones verticales del vehículo.
- La componente transversal de la velocidad es nula en el instante en que el vehículo se coloca paralelamente a la barrera.
- El vehículo es redirigido por la barrera sin experimentar movimientos de rotación en zigzag.
- El centro de gravedad del vehículo no cambia apreciablemente, aunque su carrocería sufra daños y deformaciones durante el choque.
- La barrera puede ser rígida ( $D=0$ ) o flexible ( $D>0$ ).
- Se desprecia la fuerza de rozamiento entre los neumáticos del vehículo y el pavimento de la carretera.
- La barrera no presenta discontinuidades que podrían provocar movimientos verticales bruscos del vehículo.

En base estas hipótesis el método deriva el equilibrio energético entre la energía cinética inicial y la energía de deformación posterior debido al choque. Para comprender mejor la dinámica del choque se presenta un dibujo con la nomenclatura utilizada.

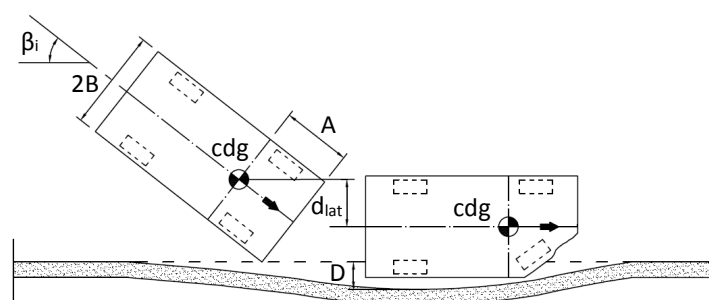


Figura A3.2. Modo de impacto y medición de los parámetros del método de Olson et al.

Donde,  $cdg$  = centro de gravedad,  $A$  = distancia del morro al  $cdg$ ,  $2B$  = anchura del vehículo,  $D$  = desplazamiento de la barrera,  $\beta_i$  = ángulo de impacto,  $v_i$  = velocidad inicial,  $M$  = masa del vehículo,  $F_{lat}$  = fuerza lateral de impacto,  $a_{lat}$  = desaceleración lateral,  $d_{lat}$  = desplazamiento del centro de gravedad del vehículo desde el instante inicial hasta redireccionar el vehículo en el sentido longitudinal.

$$E_{inicial} = E_{final} \quad [\text{Ec. A3.3}]$$

$$E_{cinética,inicial} = E_{deformación,final} \quad [\text{Ec. A3.4}]$$

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot v_i^2 = F_{lat} \cdot d_{lat} \quad [\text{Ec. A3.5}]$$

$$F_{lat} = \frac{M \cdot v_i^2}{2 \cdot d_{lat}} \quad [\text{Ec. A3.6}]$$

$$d_{lat} = [A \cdot \sin \beta_i + B \cdot \cos \beta_i] - B + D_r = A \cdot \sin \beta_i + (\cos \beta_i - 1) \cdot B + D_r \quad [\text{Ec. A3.7}]$$

$$F_{lat} = \frac{M \cdot (v \cdot \sin \beta_i)^2}{2 \cdot [A \cdot \sin \beta_i + (\cos \beta_i - 1) \cdot B + D_r]} = M \cdot a_{lat} \quad [\text{Ec. A3.8}]$$

Tal y como se puede ver, la fuerza de impacto es igual al producto de la masa por la desaceleración en el choque, donde la desaceleración depende de la velocidad inicial en el sentido perpendicular a la barrera y del ángulo de impacto, de las constantes geométricas del vehículo A y B, y del desplazamiento de la barrera producido por el impacto. Este valor de fuerza calculado por Olson et al. mide es la carga media de impacto.

En base al trabajo realizado por Olson et al., Hirsch (1986) asumió que la rigidez del vehículo y de la barrera se comporta de manera lineal, por el cual la curva fuerza de impacto – tiempo tiene una forma sinusoidal. Consecuentemente, la máxima desaceleración lateral del vehículo ( $a_{lat,máx}$ ) y la máxima fuerza de impacto ( $F_{lat,máx}$ ) son las expresadas en las ecuaciones X y X respectivamente.

$$a_{lat,máx} = \frac{\pi}{2} \cdot a_{lat} \quad [\text{Ec. A3.9}]$$

$$F_{lat,máx} = \frac{\pi}{2} \cdot F_{lat} \quad [\text{Ec. A3.10}]$$

A pesar de esta aproximación de cálculo de la fuerza máxima de impacto, la precisión del resultado es muy baja para vehículos pesados. En la Figura A3.3 se presenta gráfica que relaciona el peso del vehículo con la fuerza de impacto a partir de resultados de impacto de diferentes vehículos ensayados con una velocidad de impacto de 96,5 Km/h y un ángulo de impacto de 15°. En ella se muestran los valores de fuerza lateral media (ecuación A3.6) y fuerza lateral máxima (ecuación A3.8) predichos por el modelo utilizado, y los valores de fuerza máxima de impacto registrados de los ensayos reales.

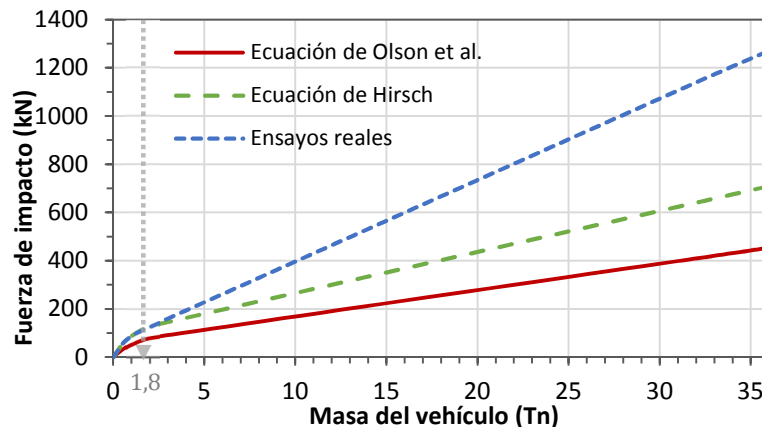


Figura A3.3. Relación masa del vehículo y fuerza de impacto para ensayos a 96,5 Km/h y ángulo de 15 °.

Tal y como se puede ver en la Figura A3.3, la precisión de los valores de fuerza máxima entre el modelo y el real disminuyen a medida que se aumenta la masa total del vehículo. La anomalía de los valores máximos entre la ecuación de Hirsch y los ensayos reales empiezan a partir de una masa superior a 1,8 Tn, llegando a valores de fuerza máxima de un 79% superior al predicho por el modelo para masas de camiones de 36 Tn.

### A3.2.- Cargas de impacto medidas experimentalmente

A continuación se presentan en las Tabla A3.4 a y b los resultados de cargas de impacto medidas experimentalmente de diferentes fuentes contra barreras de hormigón. Se puede ver que son de diferentes tipos de vehículos, perfiles, masa, velocidad y ángulo de impacto.

Tipo vehículo	Perfil	M (Kg)	v (Km/h)	$\beta_i$ (°)	F (kN)	Fuente
Turismo	NJ	1244	110,0	20,0	213,3	Grzebieta et al., 2002
Turismo	NJ	1244	81,0	45,0	471,8	
Turismo	V	1215	48,3	60,0	377,5	NHTSA, 2002
Turismo	PU	2043	101,5	26,5	292,3	Beason, 1989
Turismo	PU	817	97,7	19,9	132,9	
Turismo	V	1998	95,6	25,9	334,8	Hirsch, 1990
Turismo	V	871	98,6	21,0	142,5	
Turismo	V	892	97,3	21,0	139,0	Buth, 1990
Turismo	F	893	96,7	21,4	129,5	
Turismo	V	931	95,0	15,5	81,9	Noel et al., 1981
Turismo	V	949	94,0	21,0	93,9	
Turismo	V	1271	94,0	15,0	82,3	
Turismo	V	1285	90,0	18,5	97,9	
Turismo	V	2125	85,0	15,0	194,0	
Turismo	V	2125	96,0	24,0	309,7	

Perfiles de barrera: PU = Pendiente única, V = Vertical, NJ = New Jersey, F = Perfil F

Tabla A3.4.a. Cargas de impacto de turismos contra barreras de hormigón.

Tipo vehículo	Perfil	M (Kg)	v (Km/h)	$\beta_i$ (°)	F (kN)	Fuente
Pickup	NJ	2599	92,8	20,6	234,3	Buth, 1990
Pickup	PU	2076	97,2	25,5	307,2	Max, 1995
Pickup	-	2150	96,6	24,0	266,4	Noel et al., 1981
Autobús	V	9094	93,0	15,0	328,4	
Autobús	V	14537	97,0	15,0	939,0	Hellmich, 2002
Autobús	NJ	13000	70,0	20,0	510,0	
Camión	V	22723	82,7	16,2	1105,2*	Menges et al., 1995
Camión	F	22700	84,4	14,0	1155,6*	
Camión	F	18414	89,6	15,7	1205,0*	

Perfiles de barrera: PU = Pendiente única, V = Vertical, NJ = New Jersey, F = Perfil F

\*Valores medidos con las aceleraciones máximas en dirección x e y

*Tabla A3.4.b. Cargas de impacto de pickups, autobuses y camiones contra barreras de hormigón.*

De manera general observando las dos Tablas A3.4 a y b, se ve que los valores de carga de choque se encuentran entre los 80 y 1200 kN, según la masa, la velocidad y ángulo de impacto. En base a estos datos existe una gran diferencia según el tipo de impacto, siendo el valor de la carga de impacto de un camión de 22 Tn 15 veces superior que al de un vehículo ligero de 940 Kg.

### A3.3.- Cargas de impacto medidas en esta Tesis

Nº ensayo	Perfil	Carga de impacto (kN)	Nº ensayo	Perfil	Carga de impacto (kN)
1	R1	124,6	6	119*	107,9
2	51 1 <sup>er</sup>	118,6	7	120	126,3
3	51 2 <sup>o</sup>	122,5	8	R2	143,5
4	73	113,3	9	122	106,7
5	119	122,5	10	51 3 <sup>er</sup>	105,8
Valor medio de todos los ensayos					<b>119,2</b>

*Tabla A3.4.b. Cargas de impacto de los ensayos de impacto de esta Tesis Doctoral.*

El ensayo del perfil 123 no se ha considerado, ya que los resultados de los demás perfiles presentados son mediciones realizadas en el centro de gravedad del vehículo.



## ANEJO 4

# Método de las líneas de rotura

### A4.1.- MÉTODO DEL CÁLCULO DE ROTURA

Para determinar la resistencia a rotura de una barrera de seguridad frente al impacto de un vehículo, es necesario saber cuál es el valor de  $F$  para el cual se produce el fallo del elemento de contención. Para ello es necesario que algunos de los materiales constitutivos de la barrera plastifiquen. El empleo de métodos de cálculo plástico son más directos que los métodos elásticos y permiten determinar con facilidad los mecanismos y la carga de colapso en base a esquemas simples de fractura. La estimación del valor de carga de rotura se centra en el uso de dos métodos clásicos:

- El **método del límite inferior** de la teoría de la plasticidad garantiza que si en ningún punto del esquema de rotura planteado se supera el límite elástico del material, respetando las condiciones de contorno, la estructura no colapsa para la carga de equilibrio compatible con el esquema. En base a esto, la carga de equilibrio, y de rotura, es una cota inferior de la carga de rotura real.
- El **método del límite superior** se basa en el método de las **líneas de rotura**, en este caso la barrera se asimila a una placa. La carga resistente proporcionada por este modelo es un límite superior de la resistencia real del elemento de contención. Pueden haber numerosos esquemas de rotura compatibles con las condiciones de contorno; sin embargo, la energía involucrada y las cargas de rotura distintas para cada uno de ellos.



Se trata de cotas superiores y que pueden estar del lado de la inseguridad. El esquema que conduzca a la mínima carga de rotura es el esquema a adoptar y la carga, la cota superior.

#### A4.1.1- Método de las líneas de rotura

Este método fue propuesto por Johansen en los años 40 y recopilado con un extenso trabajo publicado en el libro *"Yield line theory"* de 1962. La representatividad y robustez de esta teoría ha sido demostrada a través de resultados experimentales por Park et al. en 1980.

El método de las líneas de rotura da unos criterios para establecer la forma de rotura y obtener por consiguiente la carga de rotura asociada sobre la placa. Al someter una placa bajo carga creciente de forma gradual se observa un comportamiento elástico del material hasta alcanzar en algún punto/sección la tensión de fisuración/plastificación de algunos de los materiales constituyentes. En ese punto/sección, las tensiones no aumentan, se mantienen o redistribuyen hacia otras partes no dañadas y aún en régimen elástico. En ese punto/sección de daño, las deformaciones siguen creciendo con el incremento de carga, habiendo tanto deformaciones mecánicas de naturaleza elástica y plástica, estas última son permanentes, incluso tras la descarga (Vrouwenvelder et al., 2003). Durante la carga continua aparecen más puntos con comportamiento plástico, donde encadenando estos puntos entre sí se forman líneas (líneas de rotura) y zonas de plasticidad hasta crear un mecanismo. En ese instante, se alcanza la carga de rotura de la placa, que es un límite superior (Murcia et al. UPC, 1993).

Para elegir el mecanismo de rotura, Johansen (1962) propone las siguientes hipótesis:

- 1º. Las líneas de rotura se consideran rectas, salvo en aquellos casos en los que la presencia de carga puntuales den lugar a los denominados conos de hundimiento.
- 2º. A lo largo de las líneas de rotura se desarrollan unos momentos máximos últimos y constantes asociados con la capacidad de la resistencia a flexión de las secciones involucradas en el mecanismo de rotura.
- 3º. Las deformaciones plásticas propias de los diferentes trozos de placa que delimitan las líneas de rotura se consideran despreciables frente a las deformaciones inducidas por las rotaciones de las superficies fraccionadas del mecanismo de rotura. Por tanto, los movimientos que experimentan los diferentes trozos de placa son únicamente giros respecto a unos ejes de giro que vienen determinados por la forma, las condiciones de apoyo y de carga de la placa.
- 4º. De los posibles mecanismos de rotura de la placa se forma aquel que da lugar a una carga de colapso menor.

El cálculo del valor de carga que provoca el mecanismo de la estructura puede realizarse mediante dos métodos: el método de equilibrio o el método de trabajos virtuales.

El **método del equilibrio** se basa en el equilibrio de cada porción en la que queda dividida de la placa. Los campos de tensiones que satisfacen las condiciones de equilibrio y compatibilidad, según el mecanismo propuesto, pueden reemplazar el proceso de integración del método del trabajo. El método se basa en establecer el equilibrio de momentos en el eje de giro de cada trozo de placa. Se iguala el momento último  $m$  a lo largo del eje de rotación con el momento provocado por la carga  $q$ . De esta forma se puede establecer la siguiente ecuación de forma genérica:

$$m \cdot l = q \cdot S \cdot d \rightarrow \text{se obtiene el valor } q \quad [\text{Ec. A4.1}]$$

Donde:

$m$  = momento último por metro lineal

$l$  = longitud del eje de rotación asociado al momento  $m$

$s$  = superficie del trozo de placa

$d$  = distancia mínima del centro de gravedad de la carga hasta al eje de giro

El **método de los trabajos virtuales**, tal y como indica su nombre, se basa en la aplicación del Teorema de los trabajos virtuales. Este teorema se anuncia como sigue: “Una placa está en equilibrio bajo la acción de un sistema de fuerzas exteriores si al imponer a la misma unos desplazamientos (virtuales) arbitrarios, compatibles con las condiciones de apoyo, el trabajo realizado por las fuerzas exteriores sobre los desplazamientos virtuales es igual al trabajo que realizan las tensiones en la placa sobre las deformaciones producidas por los desplazamientos virtuales”. El desplazamiento virtual se considera pequeño y arbitrario. Una vez que se ha supuesto un determinado mecanismo de rotura, el trabajo externo es el trabajo realizado por el desplazamiento virtual  $d$  de un determinado punto de la placa por las fuerzas externas o cargas  $q$ . Matemáticamente puede expresarse de la siguiente manera:

$$W_{ext} = \int_S q \cdot \delta \cdot dS = q \int_S \delta \cdot dS \quad [\text{Ec. A4.2}]$$

Normalmente la carga  $q$  tiene un valor constante, lo cual hace que pueda salir fuera del dominio de integración. Precisamente el dominio de integración resultante expresa conceptualmente el volumen creado por la deformación.

El trabajo interno lo realizan las acciones internas en las líneas de rotura. Las acciones internas vienen únicamente determinadas por los momentos últimos, pues los momentos torsores y las fuerzas cortantes a cada lado de la línea de rotura se consideran tan pequeños que no producen ningún movimiento relevante, de forma que el trabajo virtual realizado por ellos se considera nulo en toda la losa. Así pues, el trabajo interno realizado en una línea de rotura es el producto del momento último  $m$  a lo largo de la línea por la rotación  $\theta$  en ésta misma.

$$W_{int} = \int_{LR} m \cdot d \cdot \theta \cdot dS = \sum_{i=1}^{i=n} m \cdot \theta \cdot l_{LRi} \quad [\text{Ec. A4.3}]$$

Donde:

$\theta$  = rotación de la línea de rotura

$m$  = momento último por unidad de longitud

$l_{LRi}$  = longitud de la línea de rotura considerada

Igualando los trabajos, externo e interno, del mecanismo con las líneas de rotura consideradas, se obtiene el valor de carga  $q$ .

$$W_{ext} = W_{int} \rightarrow q \int_S \delta \cdot dS = \sum_{i=1}^{i=n} m \cdot \theta \cdot l_{LRi} \rightarrow \text{se obtiene el valor de } q \quad [\text{Ec. A4.4}]$$

#### A4.1.2- Aplicación sobre barreras de hormigón

El método de las líneas de rotura se puede aplicar para estimar la carga de rotura de una barrera de hormigón por el impacto de un vehículo. El choque del vehículo contra la barrera se puede asimilar a la aplicación de una carga estática equivalente ( $F$ ) sobre una placa.

Para ello, la barrera de hormigón se asimilar a una placa para aplicar el método de las líneas de rotura. El grosor de la barrera ( $e_b$ ) deberá relativamente pequeño respecto a las otras dos dimensiones (altura ( $h_b$ ) y longitud longitudinal de la barrera ( $L_b$ )). Además, se asume que las cargas actúan perpendicularmente al plano medio; en caso contrario aparecen importantes esfuerzos de membrana y el método de las líneas de rotura no sería válido.

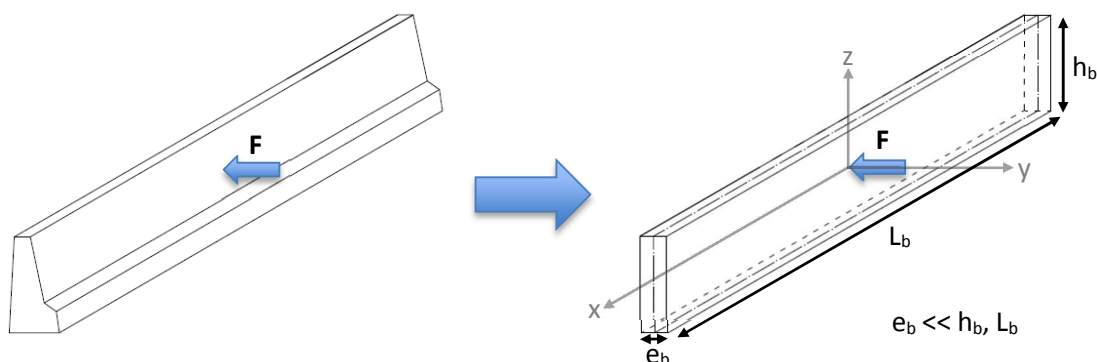


Figura A4.1. Consideración de una barrera de hormigón como placa.

Bajo estas consideraciones, la estructura trabaja principalmente a flexión. De este modo, es recomendable que la relación entre el canto y la distancia menor entre dos extremos opuestos de la placa sea menor de 1/5 (Obiol, 1978). En caso contrario, al considerarse gruesa la placa se abonará el cálculo de forma tridimensional.

## ANEJO 5

# Parametrización del desplazamiento

### A5.1.- PARAMETRIZACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO

Cálculos de los parámetros  $p_\mu$  y  $M_{pl}$  de la función  $D_{max}$  presentada en el Capítulo 5.

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{24,66}{p_\mu^{(0,3982+0,005739 \cdot M_{pl})}} \quad [\text{Ec. A5.1}]$$

A continuación se presentan los cálculos de los dos parámetros considerados.

#### A5.1.1- Momento plástico, $M_{pl}$

**Análisis en situación de servicio de secciones y elementos estructurales sometidos a flexión simple. Anejo 8. EHE 08.**

El objetivo del cálculo es encontrar el momento plástico cuando la sección del perfil empieza a plastificar.

Flexión simple en sección rectangular

En Fase II, comportamiento lineal fisurado

Hipotesis:

- Hormigón comprimido trabaja linealmente,  $\sigma_c = E_{cm} \cdot \varepsilon_c$ .

- Resistencia a tracción del hormigón nula,  $f_{ct} = 0 \text{ N/mm}^2$ .
- Adherencia perfecta,  $\varepsilon_c = \varepsilon_s$ .
- Hipotesis de Navier: las secciones se mantienen rectas durante la deformación.

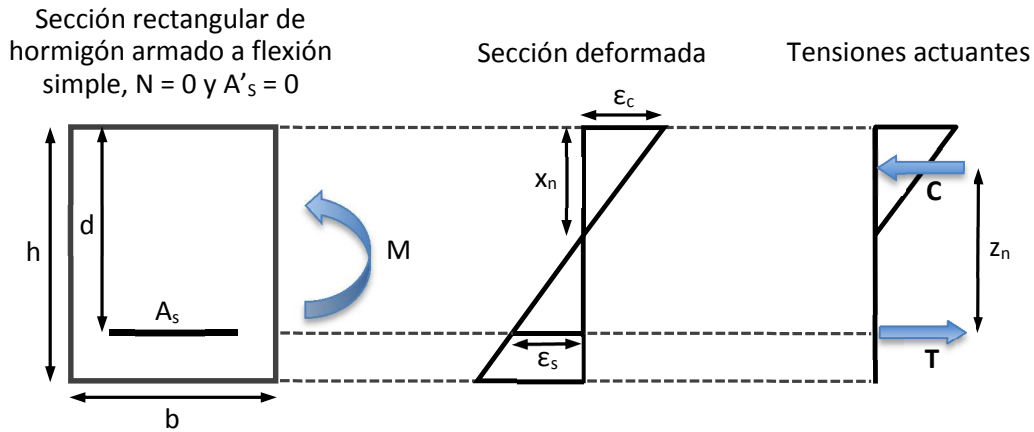


Figura A5.1. Sección de hormigón armado deformado y tensional.

Ecuaciones de equilibrio

1) Fuerzas

$$T = \sigma_s \cdot A_s = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot b \cdot x_n = C \quad [\text{Ec. A5.2}]$$

2) Momentos

$$M = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot b \cdot x_n \cdot \left(d - \frac{x_n}{3}\right) \quad [\text{Ec. A5.3}]$$

3) Compatibilidad + ecuaciones constitutivas

$$\chi = \frac{\varepsilon_s}{d - x_n} = \frac{\varepsilon_c}{x_n} \quad [\text{Ec. A5.4}]$$

$$\sigma_c = E_{cm} \cdot \varepsilon_c \quad [\text{Ec. A5.5}]$$

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad [\text{Ec. A5.6}]$$

Sustituyendo por  $\varepsilon_c$  y  $\varepsilon_s$  a la ecuación 3) se tiene,

$$\frac{\sigma_s}{d - x_n} = \frac{\eta_s \cdot \sigma_c}{x_n} \quad [\text{Ec. A5.7}]$$

$$\eta_s = \frac{E_s}{E_c} \quad [\text{Ec. A5.8}]$$

Resolviendo el sistema de las 3 ecuaciones 1), 2) y 3), se obtiene:

Dividiendo las ecuaciones 1) y 3) se obtiene la expresión  $x_n$ ,

$$x_n = d \cdot \eta_s \cdot \varphi_s \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\eta_s \cdot \varphi_s}} \right) \quad [\text{Ec. A5.9}]$$

$$\varphi_s = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad [\text{Ec. A5.10}]$$

$$z_n = d - \frac{x_n}{3} \quad [\text{Ec. A5.11}]$$

Mediante la curvatura  $\chi$ , se obtiene:

$$\chi = \frac{\varepsilon_s}{d - x_n} = \frac{1}{d - x_n} \cdot \frac{T}{A_s \cdot E_s} = \frac{1}{d - x_n} \cdot \frac{M}{A_s \cdot E_s \cdot z_n} \quad [\text{Ec. A5.12}]$$

El momento M es:

$$M = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s \cdot z_n \quad [\text{Ec. A5.13}]$$

Si primero plastifica el acero:

$$M_{pl} = \varepsilon_{yd} \cdot E_s \cdot A_s \cdot z_n \quad [\text{Ec. A5.14}]$$

Si primero plastifica el hormigón:

$$M_{pl} = \varepsilon_{c,pl} \cdot \frac{(d - x_n)}{x_n} \cdot E_s \cdot A_s \cdot z_n \quad [\text{Ec. A5.15}]$$

$$\frac{\varepsilon_s}{d - x_n} = \frac{\varepsilon_{c,pl}}{x_n} \quad [\text{Ec. A5.16}]$$

Donde,

$M_{pl}$  = momento plástico de la sección;  $\varepsilon_s$  = deformación relativa del acero;  $\varepsilon_c$  = deformación relativa del hormigón;  $\varepsilon_{yd}$  = alargamiento correspondiente al límite elástico del acero;  $\varepsilon_{c,pl}$  = alargamiento correspondiente al límite elástico del hormigón;  $E_s$  = módulo elástico del acero;  $E_c$  = módulo elástico del hormigón;  $A_s$  = sección armadura inferior,  $A'_s$  = sección armadura superior;  $N$  = esfuerzo axil;  $h$  = altura de la sección de hormigón,  $d$  = canto útil;  $b$  = anchura de la sección de hormigón;  $\varphi_s$  = cuantía geométrica de armadura;  $x_n$  = fibra neutra;  $z_n$  = brazo de palanca,  $M$  = momento actuante;  $C$  = fuerza a compresión;  $T$  = fuerza a tracción;  $\chi$  = curvatura de la sección deformada.

Para todos los casos se han adoptado los siguientes valores,

$$E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_c = 30000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{yd} = 0,02$$

$$\varepsilon_{c,pl} = 0,0035$$

Para el perfil de barrera 120, la zona de la junta se cortó parcialmente la sección del perfil dejando una sección de hormigón sin cortar. Además en esta sección de la junta se encuentran  $6\phi 12$ , las 2 barras longitudinales más las 4 barras horizontales de la parrilla. A continuación se muestran los siguientes valores medidos para el cálculo:

$$b = 138,35 \text{ mm}, h = d = 214,3 \text{ mm}, A_h = 0,0249 \text{ m}^2, A_s = 678,6 \text{ mm}^2$$

Dando a lugar que el  $M_{pl}$  de la sección será el menor de los dos casos siguientes:

Si primero plastifica el acero:

$$M_{pl} = 523,6 \text{ kNm}$$

Si primero plastifica el hormigón:

$$M_{pl} = 122,4 \text{ kNm}$$

Para el perfil de barrera 121, la zona de la junta se cortó totalmente la sección de hormigón. La única unión existente son las 2 barras  $\phi 12$  longitudinales de la barrera más las 4 barras  $\phi 12$  horizontales de la parrilla presente en cada zona de corte. En este caso, el cálculo se procede al estudio de la deformación de solamente el armado. A continuación se muestran los siguientes valores medidos para el cálculo:

$$A_s = 678,6 \text{ mm}^2$$

Se supone que la sección de barra se deforma de tal forma que la fibra neutra pasa por el centro de la barra.

$$x_n = 6 \text{ mm}, z_n = 8 \text{ mm}$$

Plastificando el armado se tiene:

$$M_{pl} = 22,8 \text{ kNm}$$

Para el perfil de barrera 122, contiene una adición de  $2 \text{ Kg/m}^3$  de fibras de polipropileno como sustitución del armado longitudinal convencional ( $2\phi 12$ ). En este caso la contribución de las fibras es en la resistencia residual una vez haya fisurado el hormigón. En este sentido, se ha creído conveniente adoptar el valor del momento de fisuración de la sección de la junta de dicho perfil, ya que coincide con el momento plástico de la sección. Además se debe tener en cuenta el perfil de porexpan que reduce la sección de hormigón y el pre-corte de 4 cm de profundidad en todo el perfil de barrera.

$$M_{pl} = M_{fis} = \frac{2 \cdot I}{h} \cdot f_{ctm,fl} \quad [\text{Ec. A5.17}]$$

$$f_{ctm,fl} = \max \left\{ \left( 1,6 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm} \right\} \quad [\text{Ec. A5.18}]$$

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad [\text{Ec. A5.19}]$$

A partir de los datos medidos de la sección 122 pre-cortada siguientes se puede calcular el  $M_{pl}$ :

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}, f_{ctm} = 2,896 \text{ MPa}, f_{ctm,fl} = 3,5 \text{ MPa}$$

Con:  $h = 390,7 \text{ mm}$ ,  $A_h = 0,148 \text{ m}^2$ ,  $I = 1,317 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$  (Inercia de la sección pre-cortada)

$$\mathbf{M_{pl} = M_{fis} = 23,6 \text{ kNm}}$$

Para el perfil de barrera 123, la zona de la junta se realizó un pre-corte de 4 cm de profundidad. Además en esta sección de la junta se encuentran  $3\phi 12$ , que conforman las 3 barras longitudinales dispuestas en este perfil. Para acabar también se tiene en cuenta el perfil de porexpan dispuesto en la base que reduce moderadamente la sección de hormigón del perfil.. A continuación se muestran los siguientes valores medidos para el cálculo:

$$b = 840,0 \text{ mm}, h = 334,2 \text{ mm}, d = 283,6 \text{ mm}, A_s = 339,3 \text{ mm}^2$$

Dando a lugar que el  $M_{pl}$  de las sección será el menor de los dos casos siguientes:

Si primero plastifica el acero:

$$M_{pl} = 371,1 \text{ kNm}$$

Si primero plastifica el hormigón:

$$\mathbf{M_{pl} = 199,7 \text{ kNm}}$$

### A5.1.2- Fuerza de rozamiento, $p_\mu$

El fuerza de rozamiento  $p_\mu$  se expresa con la siguiente expresión que depende del peso de elemento de barrera ( $m \cdot g$ ) entre corte o pre-cortes y el coeficiente de rozamiento  $\mu$  (en este caso se ha estudiado el estático).

$$p_\mu = \mu \cdot m \cdot g = \mu \cdot \gamma \cdot S \cdot L \cdot g \quad [\text{Ec. A5.20}]$$

Donde,

$\gamma$ =peso específico del hormigón,  $S$  = sección del perfil,  $L$  = longitud de barrera entre cortes o pre-cortes,  $g$  = gravedad



Para este cálculo se toman de forma general:

$$\gamma = 2300 \text{ Kg/m}^3, g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

En la tabla siguiente se muestran los valores adoptados para cada uno de los perfiles.

Parámetros	Unidades	Perfiles			
		120	121	122	123
S	m <sup>2</sup>	0,246	0,264	0,226	0,256
L	m	4	4	3	3
$\mu$	-	0,8	0,49	0,4	0,545
$p_\mu$	kN	17,8	11,7	6,1	9,5

*Tabla A5.1. Valores de  $p_\mu$  de los perfiles 120, 121, 122 y 123.*

## ANEJO 6

# Cálculo carga de impacto de un autobús (ensayo TB51)

### A6.1.- CÁLCULO CARGA DE IMPACTO DE UN AUTOBÚS (ensayo TB51)

De modo adicional, a parte del cálculo de carga del ensayo TB11 también se ha realizado para el ensayo TB51, perteneciente al autobús. Este ensayo es de interés ya que si la barrera propuesta resiste el impacto de dicho ensayo, la barrera tendrá un nivel de contención H2. Este nivel de contención es exigido en buena parte de la infraestructura viaria española. Para ello, a continuación, se presentan en la Tabla A6.1 los valores de impacto considerados. De este modo se podrá saber si la barrera de hormigón propuesta en esta tesis resiste a este tipo de choque.

Se observa que existe una gran dispersión de las cargas de impacto, destacando entre ellos el valor del Eurocódigo 1. Parte 1.1. Este valor se discrimina al considerar un número fuera del rango calculado, ya que es 5 veces superior al segundo mayor valor calculado. En esta misma línea, si se compara con los valores de impacto de los vehículos pesados calculados experimentalmente por Menges et al. (1995) y Noel et al. (1981) (ver Anejo 3); el valor del Eurocódigo 1 Parte 1.1 es más de 2 veces superior al máximo de ellos.

Respecto a los valores calculados siguiendo las indicaciones de la NCHRP y de Hirsch, registran números de impacto realmente bajos comparables con los obtenidos del ensayo TB11 del vehículo ligero de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En este sentido,

Hirsch (1978) realizó un estudio donde la fórmula planteada por la NCHRP subestima en mayor medida el valor de la carga de impacto cuando se aumenta la masa del vehículo. Por tanto, los valores calculados por la NCHRP y Hirsch no se tienen en cuenta para el cálculo de la carga de diseño para el ensayo TB51.

Carga de impacto	Modo de carga	Fuente
$F = 0,5 \cdot M \cdot \frac{v^2}{\delta_c + D_r} = 2875 \text{ kN}$ (con valores orientativos)	Lineal en 1,5 m Altura de aplicación es la del parachoques	Eurocódigo 1. Parte 1.1. Acciones Generales. Anexo B (EN 1991-1-1:2002)
$F = v \cdot \sqrt{K \cdot M} = 415 \text{ kN}$ $K \approx 300 \text{ kN/m (orientativo)}$	Puntual Altura de aplicación a 1,25 m del suelo	Eurocódigo 1. Parte 1.7. Acciones Accidentales (EN 1991-1-7:2006) Anejo C
$* F = \frac{M \cdot (v \cdot \sin \beta_i)^2}{2 \cdot [A \cdot \sin \beta_i + (\cos \beta_i - 1) \cdot B + D_r]} = 138 \text{ kN}$ $F_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot F = 217 \text{ kN}$ $A = 2,5 \text{ (distancia entre eje de la rueda delantera y frontal)} + 3,8 \text{ (distancia eje de la rueda delantera norma)}$ $2B = 2,55 \text{ m}$	-	NCHRP Report 86 (1970) Hirsch (1978)
$F = M \cdot a = 510 \text{ kN}$	-	Hellmich (2002)

\*Los valores de A y B son tomados con medidas usuales de autocares. Para  $A = 2,5 + 3,8 = 6,3 \text{ m}$  (distancia entre eje de la rueda delantera y frontal, según modelo) + (distancia eje de la rueda delantera al centro de gravedad, dictado por la norma EN 1317). Para  $2B = 2,5 \text{ m}$  (ancho usual de un autocar)

Tabla A6.1. Valores de impacto para el ensayo TB51 de la norma EN 1317.

Por último, como valores de impacto quedan los planteados por la fórmula del Eurocódigo 1 Parte 1.7 y el valor experimental medido por Hellmich. Los dos valores son parecidos (entre 415 kN y 510 kN), pudiéndose tomar como válido cualquier de los dos. En esta tesis se toma el valor calculado por Hellmich, debido a que es un resultado experimental, por lo que es un resultado exacto frente a la aproximación del valor del Eurocódigo 1 Parte 1.7; y además se está al lado de la seguridad al considerar una carga mayor.

El modo de carga difiere según la fuente (ya sea en forma puntual, lineal o superficial) con puntos de aplicación desde la altura del parachoques del vehículo hasta la coronación. En la realidad, el choque se produce de manera superficial de forma desigual; Noel et al. (1981) determina que el choque del vehículo es representado como una presión de contacto con forma de un semiovoide. Para una mayor simplicidad en el cálculo de rotura, se diseñará una carga de impacto puntual y lineal, con longitudes lineales entre 0,5 y 1,5 m (valores límites establecidos de los eurocódigos 1 Parte 2 y Parte 1.1, respectivamente). La altura de aplicación se propone

en los casos más desfavorables pensando en el caso de impacto de un vehículo pesado, actuando la carga en la coronación, y a 0,1 y a 0,2 m por debajo de dicho punto.

Como resumen de la carga de diseño a realizar para el cálculo a rotura de la barrera de hormigón, se presentan en la Tabla A6.2 los valores de carga de impacto y su modo de carga para el choque de un vehículo ligero (ensayo TB11) y de un autobús (ensayo TB51). Si la barrera diseñada resiste a estos valores de choque, se podrá considerar una barrera con un nivel de contención H2 de acuerdo con la norma EN 1317.

Ensayo	Carga de impacto (kN)	Modo de carga (m)			Altura de aplicación (m)			
		Puntual	Lineal			Coronación	0,1	0,2
TB11	119		Puntual	0,5	1			
		Lineal						
TB51	510	Puntual	0,5	1	1,5	Coronación	0,1	0,2
			Lineal					

Tabla A6.2. Carga de diseño para el cálculo a rotura.



## ANEJO 7

# Nomenclatura de los subcasos de rotura de los perfiles 51, 122 y 123

### A7.1.- NOMENCLATURA DE LOS SUBCASOS DE ROTURA DE LOS PERFILES 51, 122 y 123

A continuación se muestra en las Tablas A7.1-7 la nomenclatura de todos los subcasos estudiados en esta Tesis Doctoral en el cálculo por el método de las líneas de rotura.

## A7.1.1- Perfil 51

Casos	Parámetro geométricos					Nomenclatura subcaso	Nº subcaso total
	H (m)	h <sub>R</sub> (m)	a <sub>R</sub> (m)	a' (m)	L <sub>f</sub> (m)		
1	0,5	-	-	-	-	1.1	1
	0,2	-	-	-	-	1.2	2
2	0,5	-	0,5	-	-	2.1	3
	0,5	-	1	-	-	2.2	4
	0,5	-	1,5	-	-	2.3	5
	0,2	-	0,5	-	-	2.4	6
	0,2	-	1	-	-	2.5	7
	0,2	-	1,5	-	-	2.6	8
3	0,5	-	-	-	-	3.1	9
	0,2	-	-	-	-	3.2	10
4	0,5	0,1	-	-	-	4.1	11
	0,5	0,2	-	-	-	4.2	12
5	0,5	0,1	0,5	-	-	5.1	13
	0,5	0,1	1	-	-	5.2	14
	0,5	0,1	1,5	-	-	5.3	15
	0,5	0,2	0,5	-	-	5.4	16
	0,5	0,2	1	-	-	5.5	17
	0,5	0,2	1,5	-	-	5.6	18
6	0,5	-	-	-	0,5	6.1	19
	0,5	-	-	-	1	6.2	20
	0,5	-	-	-	1,5	6.3	21
	0,2	-	-	-	0,5	6.4	22
	0,2	-	-	-	1	6.5	23
	0,2	-	-	-	1,5	6.6	24
7	0,5	-	0,5	-	0,5	7.1	25
	0,5	-	1	-	1,	7.2	26
	0,5	-	1,5	-	1,5	7.3	27
	0,2	-	0,5	-	0,5	7.4	28
	0,2	-	1	-	1	7.5	29
	0,2	-	1,5	-	1,5	7.6	30
8	0,5	-	1	0,5	0,5	8.1	31
	0,5	-	1,5	1	1	8.2	32
	0,5	-	2	1,5	1,5	8.3	33
	0,2	-	1	0,5	0,5	8.4	34
	0,2	-	1,5	1	1	8.5	35
	0,2	-	2	1,5	1,5	8.6	36

Tabla A7.1. Casos 1 – 8, perfil 51.

Casos	Parámetros geométricos					Nomenclatura subcaso	Nº subcaso total
	H (m)	h <sub>R</sub> (m)	a <sub>R</sub> (m)	a' (m)	L <sub>f</sub> (m)		
9	0,5	-	1	-	0,5	9.1	37
	0,5	-	1,5	-	1	9.2	38
	0,5	-	2	-	1,5	9.3	39
	0,2	-	1	-	0,5	9.4	40
	0,2	-	1,5	-	1	9.5	41
	0,2	-	2	-	1,5	9.6	42
10	0,5	-	-	-	0,5	10.1	43
	0,5	-	-	-	1	10.2	44
	0,5	-	-	-	1,5	10.3	45
	0,2	-	-	-	0,5	10.4	46
	0,2	-	-	-	1	10.5	47
	0,2	-	-	-	1,5	10.6	48
11	0,5	0,1	-	-	0,5	11.1	49
	0,5	0,1	-	-	1	11.2	50
	0,5	0,1	-	-	1,5	11.3	51
	0,5	0,2	-	-	0,5	11.4	52
	0,5	0,2	-	-	1	11.5	53
	0,5	0,2	-	-	1,5	11.6	54
12	0,5	0,1	0,5	-	0,5	12.1	55
	0,5	0,1	1	-	1	12.2	56
	0,5	0,1	1,5	-	1,5	12.3	57
	0,5	0,2	0,5	-	0,5	12.4	58
	0,5	0,2	1	-	1	12.5	59
	0,5	0,2	1,5	-	1,5	12.6	60
13	0,5	0,1	1	0,5	0,5	13.1	61
	0,5	0,1	1,5	1	1	13.2	62
	0,5	0,1	2	1,5	1,5	13.3	63
	0,5	0,2	1	0,5	0,5	13.4	64
	0,5	0,2	1,5	1	1	13.5	65
	0,5	0,2	2	1,5	1,5	13.6	66
14	0,5	0,1	0,5	-	0,5	14.1	67
	0,5	0,1	1	-	1	14.2	68
	0,5	0,1	1,5	-	1,5	14.3	69
	0,5	0,2	0,5	-	0,5	14.4	70
	0,5	0,2	1	-	1	14.5	71
	0,5	0,2	1,5	-	1,5	14.6	72

Tabla A7.2. Casos 9 – 14, perfil 51.



Casos	Parámetros geométricos					Nomenclatura subcaso	Nº subcaso total
	H (m)	h <sub>R</sub> (m)	a <sub>R</sub> (m)	a' (m)	L <sub>f</sub> (m)		
15	0,5	0,1	0,5	-	0,5	15.1	73
	0,5	0,1	1	-	1	15.2	74
	0,5	0,1	1,5	-	1,5	15.3	75
	0,5	0,2	0,5	-	0,5	15.4	76
	0,5	0,2	1	-	1	15.5	77
	0,5	0,2	1,5	-	1,5	15.6	78
	0,2	0,1	0,5	-	0,5	15.7	79
	0,2	0,1	1	-	1	15.8	80
	0,2	0,1	1,5	-	1,5	15.9	81

Tabla A7.3. Caso 15, perfil 51.

### A7.1.2- Perfil 122

Casos	Parámetro geométricos					Nomenclatura subcaso	Nº subcaso total
	H (m)	h <sub>R</sub> (m)	a <sub>R</sub> (m)	a' (m)	L <sub>f</sub> (m)		
16	0,5	-	-	-	-	16.1	82
	0,2	-	-	-	-	16.2	83
17	0,5	0,1	-	-	-	17.1	84
	0,5	0,2	-	-	-	17.2	85
18	0,5	0,1	0,5	-	-	18.1	86
	0,5	0,1	1	-	-	18.2	87
	0,5	0,1	1,5	-	-	18.3	88
	0,5	0,2	0,5	-	-	18.4	89
	0,5	0,2	1	-	-	18.5	90
	0,5	0,2	1,5	-	-	18.6	91
19	0,5	-	-	-	0,5	19.1	92
	0,5	-	-	-	1	19.2	93
	0,5	-	-	-	1,5	19.3	94
	0,2	-	-	-	0,5	19.4	95
	0,2	-	-	-	1	19.5	96
	0,2	-	-	-	1,5	19.6	97
20	0,5	0,1	-	-	0,5	20.1	98
	0,5	0,1	-	-	1	20.2	99
	0,5	0,1	-	-	1,5	20.3	100
	0,5	0,2	-	-	0,5	20.4	101
	0,5	0,2	-	-	1	20.5	102
	0,5	0,2	-	-	1,5	20.6	103

Tabla A7.4. Caso 16 - 20, perfil 122.

Casos	Parámetro geométricos					Nomenclatura subcaso	Nº subcaso total
	H (m)	h <sub>R</sub> (m)	a <sub>R</sub> (m)	a' (m)	L <sub>f</sub> (m)		
21	0,5	0,1	0,5	-	0,5	21.1	104
	0,5	0,1	1	-	1	21.2	105
	0,5	0,1	1,5	-	1,5	21.3	106
	0,5	0,2	0,5	-	0,5	21.4	107
	0,5	0,2	1	-	1	21.5	108
	0,5	0,2	1,5	-	1,5	21.6	109
22	-	-	-	-	0,5	22.1	110
	-	-	-	-	1	22.2	111
	-	-	-	-	1,5	22.3	112
23	-	-	-	-	0,5	23.1	113
	-	-	-	-	1	23.2	114
	-	-	-	-	1,5	23.3	115

Tabla A7.5. Casos 21 - 23, perfil 122.

### A7.1.3- Perfil 123

Casos	Parámetro geométricos					Nomenclatura subcaso	Nº subcaso total
	H (m)	h <sub>R</sub> (m)	a <sub>R</sub> (m)	a' (m)	L <sub>f</sub> (m)		
24	0,5	-	-	-	-	24.1	116
	0,2	-	-	-	-	24.2	117
25	0,5	0,1	-	-	-	25.1	118
	0,5	0,2	-	-	-	25.2	119
26	0,5	0,1	0,5	-	-	26.1	120
	0,5	0,1	1	-	-	26.2	121
	0,5	0,1	1,5	-	-	26.3	122
	0,5	0,2	0,5	-	-	26.4	123
	0,5	0,2	1	-	-	26.5	124
	0,5	0,2	1,5	-	-	26.6	125
27	0,5	-	-	-	0,5	27.1	126
	0,5	-	-	-	1	27.2	127
	0,5	-	-	-	1,5	27.3	128
	0,2	-	-	-	0,5	27.4	129
	0,2	-	-	-	1	27.5	130
	0,2	-	-	-	1,5	27.6	131

Tabla A7.6. Casos 24 - 27, perfil 123.

Casos	Parámetro geométricos					Nomenclatura subcaso	Nº subcaso total
	H (m)	h <sub>R</sub> (m)	a <sub>R</sub> (m)	a' (m)	L <sub>f</sub> (m)		
24	0,5	-	-	-	-	24.1	116
	0,2	-	-	-	-	24.2	117
25	0,5	0,1	-	-	-	25.1	118
	0,5	0,2	-	-	-	25.2	119
26	0,5	0,1	0,5	-	-	26.1	120
	0,5	0,1	1	-	-	26.2	121
	0,5	0,1	1,5	-	-	26.3	122
	0,5	0,2	0,5	-	-	26.4	123
	0,5	0,2	1	-	-	26.5	124
	0,5	0,2	1,5	-	-	26.6	125
27	0,5	-	-	-	0,5	27.1	126
	0,5	-	-	-	1	27.2	127
	0,5	-	-	-	1,5	27.3	128
	0,2	-	-	-	0,5	27.4	129
	0,2	-	-	-	1	27.5	130
	0,2	-	-	-	1,5	27.6	131
28	0,5	0,1	-	-	0,5	28.1	132
	0,5	0,1	-	-	1	28.2	133
	0,5	0,1	-	-	1,5	28.3	134
	0,5	0,2	-	-	0,5	28.4	135
	0,5	0,2	-	-	1	28.5	136
	0,5	0,2	-	-	1,5	28.6	137
29	0,5	0,1	0,5	-	0,5	29.1	138
	0,5	0,1	1	-	1	29.2	139
	0,5	0,1	1,5	-	1,5	29.3	140
	0,5	0,2	0,5	-	0,5	29.4	141
	0,5	0,2	1	-	1	29.5	142
	0,5	0,2	1,5	-	1,5	29.6	143
30	-	-	-	-	0,5	30.1	144
	-	-	-	-	1	30.2	145
	-	-	-	-	1,5	30.3	146
31	-	-	-	-	0,5	31.1	147
	-	-	-	-	1	31.2	148
	-	-	-	-	1,5	31.3	149

Tabla A7.7. Casos 24 - 31, perfil 123.

## ANEJO 8

### Cálculos de cada caso de rotura

#### A8.1.- DATOS DE LOS MATERIALES

En el presente anejo, se presentan los resultados de los cálculos realizados por los casos de rotura por el método de las líneas de rotura (Apartados A8.2-3) y al cálculo a punzonamiento para el perfil 122 (Apartado A8.4).

En este apartado, en la Tabla A8.1 se muestran los valores de los parámetros base del hormigón y del acero del armado para el cálculo de todos los casos.

Hormigón			Acero		
Parámetro	Valor	Unidades	Parámetro	Valor	Unidades
$f_{ck}$	30	MPa	$E_s$	200000	MPa
$f_{ct,m}$	2,896	MPa	$\eta_s$	7	-
$f_{cm}$	38	MPa	$\epsilon_{yd}$	0,002	-
$E_{cm}$	28577	MPa	$f_{yk}$	500	MPa
$\epsilon_{c,pl}$	0,002	-	$\gamma_s$	1,15	-
$\gamma_c$	1,5	-	$f_{yd}$	435	MPa
$f_{cd}$	20	MPa	$A_{1\phi 12}$	113,1	mm <sup>2</sup>

Tabla A8.1. Datos de cálculo del hormigón y del acero.

Respecto al cálculo con las fibras, los momentos últimos se han calculado en base al método propuesto por la RILEM. Para ello, es necesario saber las resistencias residuales con anchos de fisura de 0,5 mm ( $f_{R1}$ ) y 3,5 mm ( $f_{R4}$ ). En base a cálculos experimentales del Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló de la UPC con las fibras de polipropileno utilizadas en esta tesis y fibras metálicas, se tienen las expresiones siguientes que relacionen la cuantía de fibras ( $x$ , en Kg) con los valores de las tensiones  $f_{R1}$  y  $f_{R4}$  en MPa.

#### Fibras de polipropileno

$$f_{R1} = 0,2868 \cdot x + 0,9582$$

$$f_{R4} = 1,3468 \cdot f_{R1}$$

#### Fibras metálicas

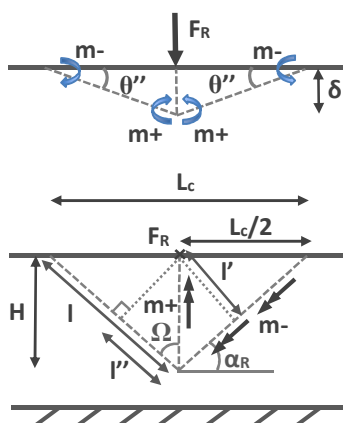
$$f_{R1} = 0,0871 \cdot x + 0,702$$

$$f_{R4} = 0,926 \cdot f_{R1}$$

## A8.2.- EXPRESIONES DE CÁLCULO DE CADA CASO DE ROTURA

A continuación se presentan las expresiones de carga de rotura de cada caso estudiado. Como se podrá ver, los casos que pertenecen a un perfil diferente se agrupan bajo la misma forma de rotura, ya que la expresión es la misma.

### A8.2.1- Casos 1, 16, 24



$F_R$  = carga puntual de rotura

$\delta$  = deformación de la placa

$\theta''$  = ángulo de giro alrededor eje vertical,  $\theta'' \approx \frac{\delta}{L_c/2}$

$\theta'$  = ángulo de giro alrededor eje horizontal,  $\theta' \approx \frac{\delta}{H}$

$H$  = altura de rotura desde la coronación

$L_c$  = longitud de rotura en coronación

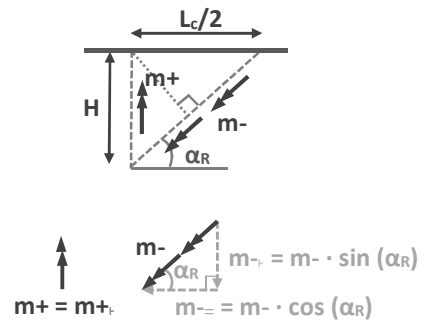
$l$  = longitud línea de rotura con  $m^-$

$l'$  = longitud de inclinación del plano de rotura

$l''$  = longitud de la línea de rotura con  $m^+$  proyectada a la directriz de giro del plano de rotura

$\alpha_R$  = ángulo de inclinación de la línea de rotura con  $m^-$

$m^-$  = momento lineal negativo = momento lineal de fisuración  
 $m^+$  = momento lineal positivo = momento lineal último  
 Descomponiendo los momentos en sentido vertical y horizontal, se tiene:  
Alrededor del eje vertical  
 $m_{\mp}^-$  = momento lineal negativo = momento lineal de fisuración  
 $m_{\mp}^+$  = momento lineal positivo = momento lineal último  
Alrededor del eje horizontal  
 $m_{\pm}^-$  = momento lineal negativo = momento lineal de fisuración  
 $m_{\pm}^+$  = momento lineal positivo = momento lineal último



Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$W_{ext} = W_{int}$$

$$F_R \cdot \delta = 2 \cdot [m^- \cdot l \cdot \theta + m^+ \cdot l' \cdot \theta]$$

$$F_R \cdot \delta = 2 \cdot \left[ m^- \cdot l \cdot \frac{\delta}{l'} + m^+ \cdot l' \cdot \frac{\delta}{l'} \right]$$

$$F_R \cdot \delta = 2 \cdot \left[ m^- \cdot H / \sin \alpha \cdot \frac{\delta}{H \cdot \sin \Omega} + m^+ \cdot H \cdot \cos \Omega \cdot \frac{\delta}{H \cdot \sin \Omega} \right]$$

$$F = 2 \cdot \left[ m^+ \cdot \frac{1}{\tan \Omega} + m^- \cdot \frac{1}{\sin \Omega \cdot \sin \alpha_R} \right]$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

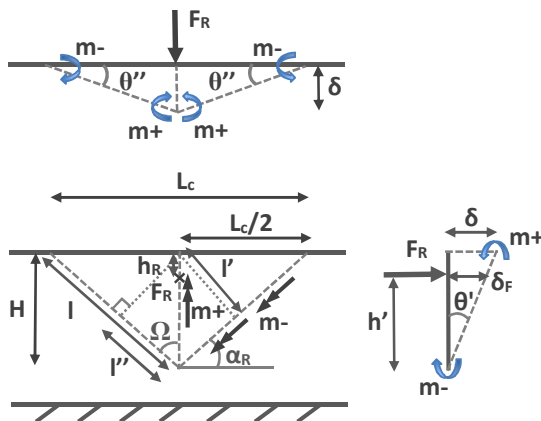
$$W_{ext} = W_{int}$$

$$F_R \cdot \delta = 2 \cdot [m_{\mp}^- \cdot H \cdot \theta'' + m_{\mp}^+ \cdot H \cdot \theta'' + m_{\pm}^- \cdot L_c/2 \cdot \theta' + m_{\pm}^+ \cdot 0 \cdot \theta']$$

$$F_R \cdot \delta = 2 \cdot \left[ m_{\mp}^- \cdot H \cdot \frac{\delta}{H/\tan \alpha_R} + m_{\mp}^+ \cdot H \cdot \frac{\delta}{H/\tan \alpha_R} + m_{\pm}^- \cdot H/\tan \alpha_R \cdot \frac{\delta}{H} \right]$$

$$F_R = 2 \left[ m_{\mp}^- \cdot \tan \alpha_R + m_{\mp}^+ \cdot \tan \alpha + m_{\pm}^- \cdot \frac{1}{\tan \alpha_R} \right]$$

**A8.2.2- Casos 4, 17, 25**



$h_R$  = distancia de aplicación de la carga respecto a la coronación

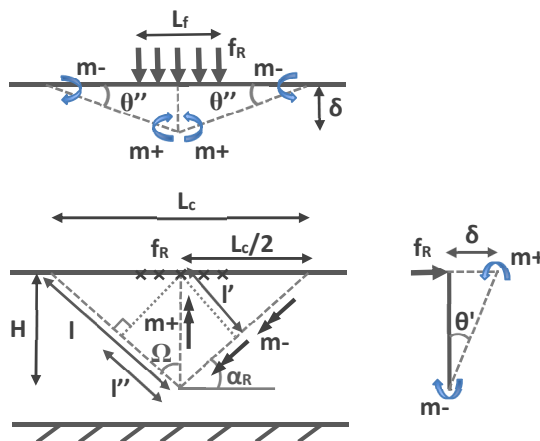
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = 2 \cdot \frac{H}{h'} \left[ m^+ \cdot \frac{1}{\tan \Omega} + m^- \cdot \frac{1}{\sin \Omega \cdot \sin \alpha_R} \right]$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = 2 \cdot \frac{H}{h'} \left[ m_{\perp}^- \cdot \tan \alpha_R + m_{\perp}^+ \cdot \tan \alpha_R + m_{\parallel}^- \cdot \frac{1}{\tan \alpha_R} \right]$$

### A8.2.3- Casos 6, 19, 27



$f_R =$  carga lineal de rotura

$L_f =$  longitud de aplicación de la carga lineal

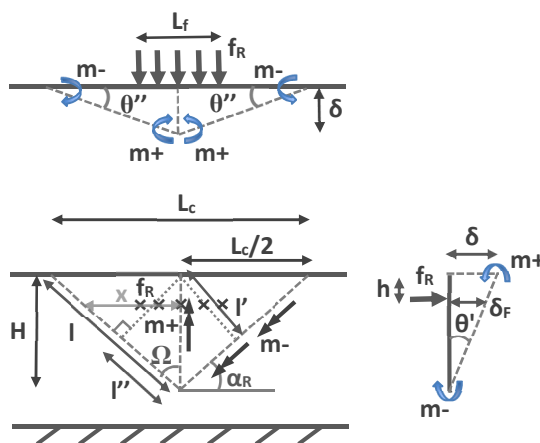
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{4}{\left(1 + \frac{2 \cdot H - L_f \cdot \tan \Omega}{2 \cdot H}\right)} \cdot \left[ m^+ \cdot \frac{1}{\tan \Omega} + m^- \cdot \frac{1}{\sin \Omega \cdot \sin \alpha_R} \right]$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{4}{\left(1 + \frac{2 \cdot H - L_f \cdot \tan \Omega}{2 \cdot H}\right)} \left[ m_{\perp}^- \cdot \tan \alpha_R + m_{\perp}^+ \cdot \tan \alpha_R + m_{\parallel}^- \cdot \frac{1}{\tan \alpha_R} \right]$$

### A8.2.4- Casos 11, 20, 28



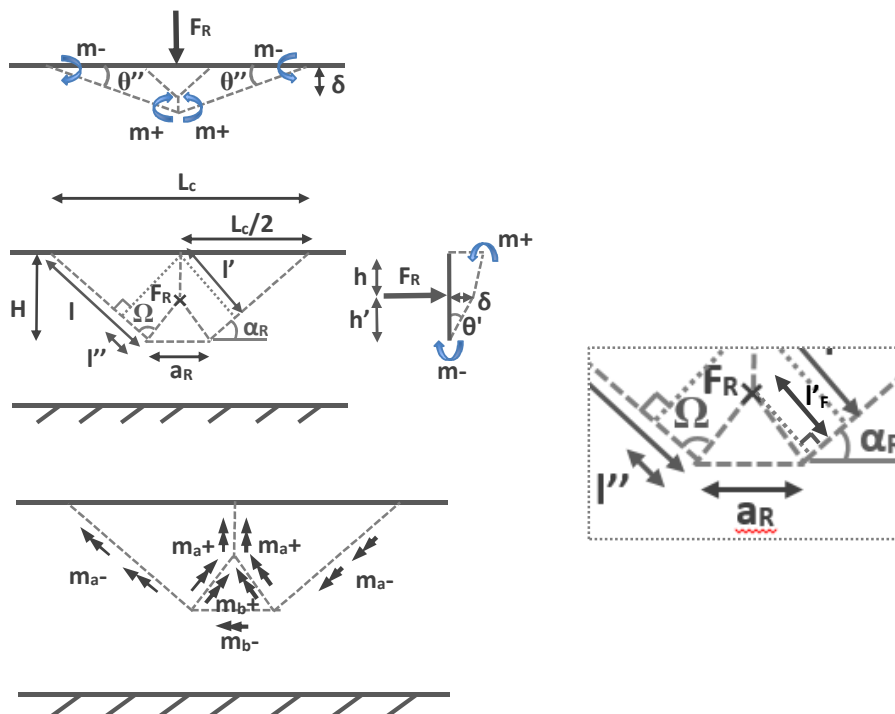
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{4 \cdot H}{h' \cdot \left(2 - \frac{L_f}{2 \cdot x}\right)} \cdot \left[ m^+ \cdot \frac{1}{\tan \Omega} + m^- \cdot \frac{1}{\sin \Omega \cdot \sin \alpha_R} \right]$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{4 \cdot H}{h' \cdot \left(2 - \frac{L_f}{2 \cdot x}\right)} \cdot \left[ m_{\perp}^- \cdot \tan \alpha_R + m_{\perp}^+ \cdot \tan \alpha_R + m_{\parallel}^- \cdot \frac{1}{\tan \alpha_R} \right]$$

### A8.2.5- Casos 5, 18, 26



Cálculo líneas de rotura propuestas:

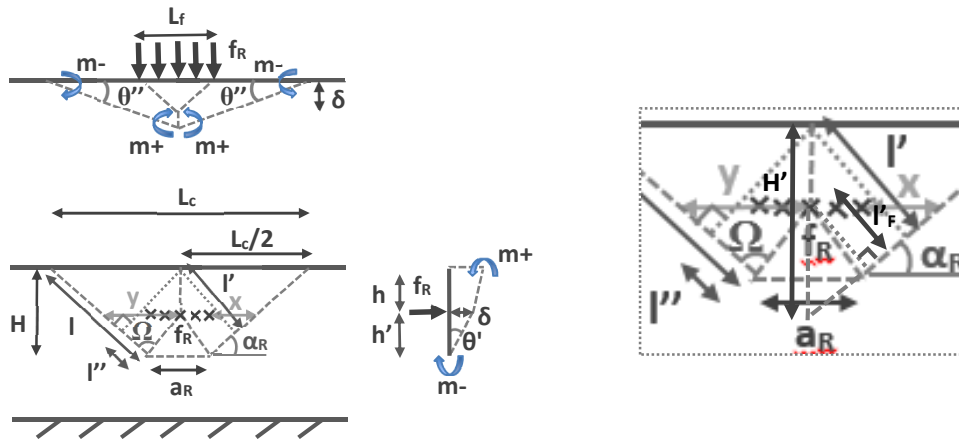
$$F_R = \frac{l'}{l'_F} \cdot \left[ \frac{2}{l'} \cdot (m_{a^+} \cdot l'' + m_{a^-} \cdot l) + \frac{a_R \cdot l'_F}{l' \cdot h'} \cdot (m_{b^+} + m_{b^-}) \right]$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = \frac{l'}{l'_F} \cdot \left[ 2 \cdot \left( (m_{a^+} + m_{a^-}) \cdot \frac{2 \cdot H}{L_c} + m_{a^+} \cdot \frac{a_R}{2 \cdot H'} + m_{a^-} \cdot \frac{H}{H' \cdot \tan \alpha_R} \right) + \frac{a_R \cdot \delta_F}{h'} \cdot (m_{b^+} + m_{b^-}) \right]$$



## A8.2.6- Casos 12, 21, 29



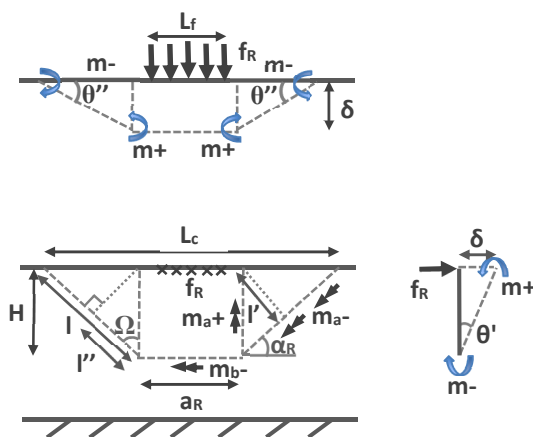
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{2 \cdot l'}{l'_F \cdot \left(1 + \frac{x}{y}\right)} \cdot \left[ \frac{2}{l'} \cdot (m_{a^+} \cdot l'' + m_{a^-} \cdot l) + \frac{a_R \cdot l'_F}{l' \cdot h'} \cdot (m_{b^+} + m_{b^-}) \right]$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{2 \cdot l'}{l'_F \cdot \left(1 + \frac{x}{y}\right)} \cdot \left[ 2 \cdot \left( (m_{a^+} + m_{a^-}) \cdot \frac{2 \cdot H}{L_c} + m_{a^+} \cdot \frac{a_R}{2 \cdot H'} + m_{a^-} \cdot \frac{H}{H' \cdot \tan \alpha_R} \right) + \frac{a_R \cdot \delta_F}{h'} \cdot (m_{b^+} + m_{b^-}) \right]$$

## A8.2.7- Caso 7



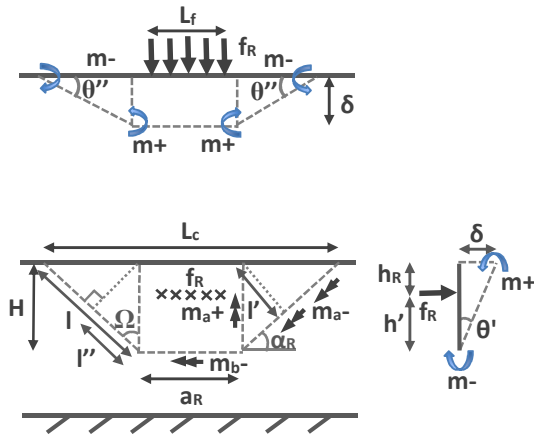
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = f_R \cdot L_f = 2 \cdot \left[ m_{a^+} \cdot \frac{1}{\tan \Omega} + m_{a^-} \cdot \frac{1}{\sin \Omega \cdot \sin \alpha_R} \right] + m_{b^-} \cdot \frac{a_R}{H}$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = f_R \cdot L_f = 2 \cdot \left[ (m_{a^-} + m_{a^+}) \cdot \tan \alpha_R + m_{a^-} \cdot \frac{1}{\tan \alpha_R} \right] + m_{b^-} \cdot \frac{a_R}{H}$$

## A8.2.8- Caso 15



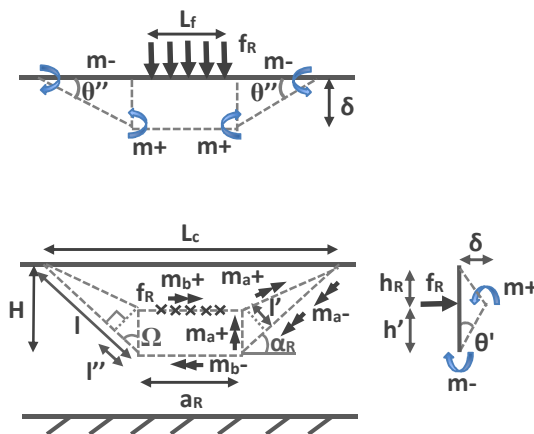
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{H}{h'} \cdot \left[ 2 \cdot \left[ m_{a^+} \cdot \frac{1}{\tan \Omega} + m_{a^-} \cdot \frac{1}{\sin \Omega \cdot \sin \alpha_R} \right] + m_{b^-} \cdot \frac{a_R}{H} \right]$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{H}{h'} \cdot \left[ 2 \cdot \left[ (m_{a^-} + m_{a^+}) \cdot \tan \alpha_R + m_{a^-} \cdot \frac{1}{\tan \alpha_R} \right] + m_{b^-} \cdot \frac{a_R}{H} \right]$$

## A8.2.9- Caso 14



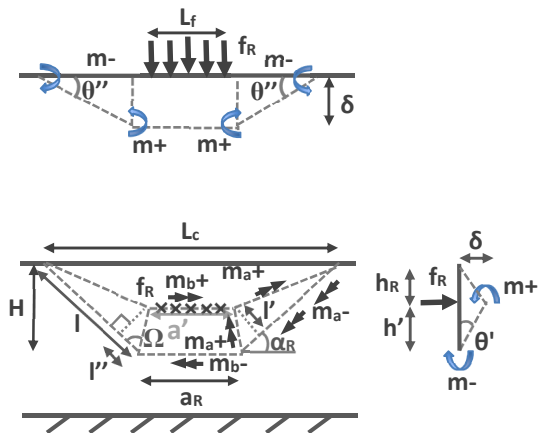
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = f_R \cdot L_f = 2 \cdot \frac{l}{l'} \cdot (m_{a^+} + m_{a^-}) + \frac{a_R}{h'} \cdot (m_{b^+} + m_{b^-}) + \frac{a_R}{h_R} \cdot m_{b^+} + \frac{(L_c - a_R)}{h_R} \cdot m_{c^+}$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = f_R \cdot L_f = 2 \cdot \frac{H}{h'} \cdot \left[ (m_{a^-} + m_{a^+}) \cdot \tan \alpha_R + (m_{a^-} + m_{a^+}) \cdot \frac{1}{\tan \alpha_R} \right] + \frac{a_R}{h'} \cdot (m_{b^+} + m_{b^-}) + \frac{a_R}{h_R} \cdot m_{b^+} + \frac{(L_c - a_R)}{h_R} \cdot m_{c^+}$$

## A8.2.10- Caso 13



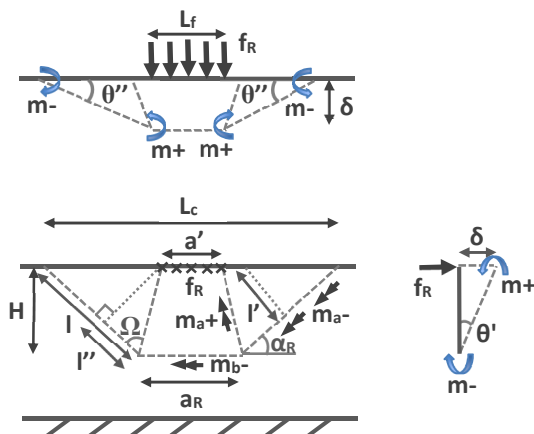
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = f_R \cdot L_f = 2 \cdot \frac{l}{l'} \cdot (m_{a^+} + m_{a^-}) + \frac{a_R}{h'} \cdot (m_{b^+} + m_{b^-}) + \frac{a_R}{h_R} \cdot m_{b^+} + \frac{(L_c - a_R)}{h_R} \cdot m_{c^+}$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = f_R \cdot L_f = 2 \cdot \left[ \frac{H}{h'} \cdot \left( (m_{a^+} + m_{a^-}) \cdot \tan \alpha_R + (m_{a^+} + m_{a^-}) \cdot \frac{1}{\tan \alpha_R} \right) \right] + \frac{a_R}{h'} \cdot (m_{b^+} + m_{b^-}) + \frac{a_R}{h_R} \cdot m_{b^+} + \frac{(L_c - a_R)}{h_R} \cdot m_{c^+}$$

## A8.2.11- Caso 8



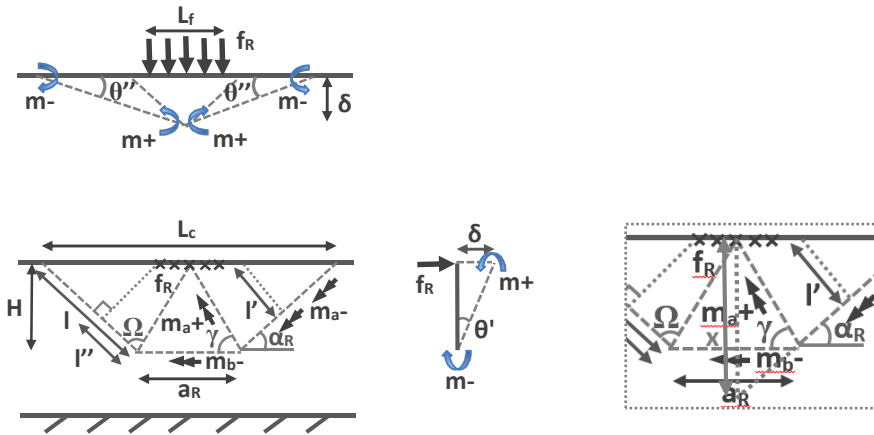
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = f_R \cdot L_f = 2 \cdot \left[ m_{a^+} \cdot \frac{1}{\tan \Omega} + m_{a^-} \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \Omega \cdot \sin \alpha_R} \right] + m_{b^+} \cdot \frac{(a_R - a')}{H} + m_{b^-} \cdot \frac{a_R}{H}$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = f_R \cdot L_f = 2 \cdot \left[ (m_{a^+} + m_{a^-}) \cdot \frac{2 \cdot H}{(L_c - a')} + m_{a^+} \cdot \frac{H}{x \cdot \tan \alpha_R} + m_{a^-} \cdot \frac{a_R - a'}{2 \cdot x} \right] + m_{b^+} \cdot \frac{(a_R - a')}{H} + m_{b^-} \cdot \frac{a_R}{H}$$

**A8.2.12- Caso 9**



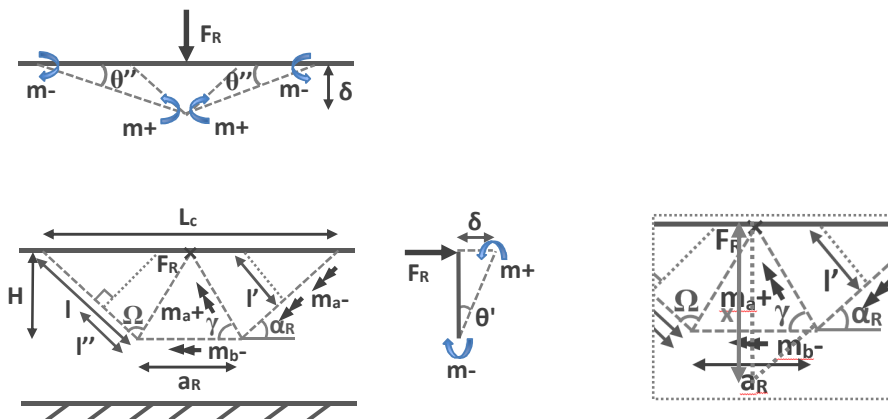
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{1}{\left(1 - \frac{L_f}{2 \cdot L_c}\right)} \cdot \left[ 2 \cdot \left[ m_{a+} \cdot \frac{1}{\tan \Omega} + m_{a-} \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \Omega \cdot \sin \alpha_R} \right] + m_{b+} \cdot \frac{a_R}{H} + m_{b-} \cdot \frac{a_R}{H} \right]$$

Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{1}{\left(1 - \frac{L_f}{2 \cdot L_c}\right)} \cdot \left[ 2 \cdot \left[ (m_{a-} + m_{a+}) \cdot \frac{2 \cdot H}{L_c} + m_{a-} \cdot \frac{H}{x \cdot \tan \alpha_R} + m_{a+} \cdot \frac{a_R}{2 \cdot x} \right] + m_{b+} \cdot \frac{a_R}{H} + m_{b-} \cdot \frac{a_R}{H} \right]$$

**A8.2.13- Caso 2**



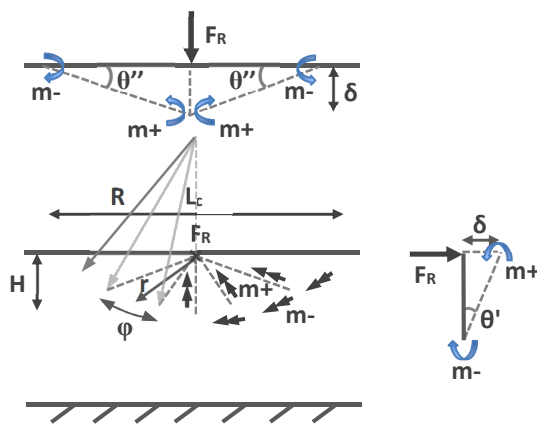
Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = 2 \cdot \left[ m_{a+} \cdot \frac{1}{\tan \Omega} + m_{a-} \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \Omega \cdot \sin \alpha_R} \right] + m_{b+} \cdot \frac{a_R}{H} + m_{b-} \cdot \frac{a_R}{H}$$

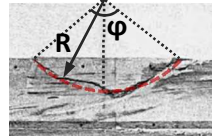
Cálculo líneas de rotura propuestas con momentos descompuestos en ejes horizontal y vertical:

$$F_R = 2 \cdot \left[ (m_{a-} + m_{a+}) \cdot \frac{2 \cdot H}{L_c} + m_{a-} \cdot \frac{H}{x \cdot \tan \alpha_R} + m_{a+} \cdot \frac{a_R}{2 \cdot x} \right] + m_{b+} \cdot \frac{a_R}{H} + m_{b-} \cdot \frac{a_R}{H}$$

## A8.2.14- Caso 3



$R$  = radio del círculo de rotura  
 $r$  = distancia entre el contorno de rotura  
 y el punto de aplicación de la carga  
 $\varphi$  = longitud de arco

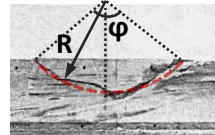
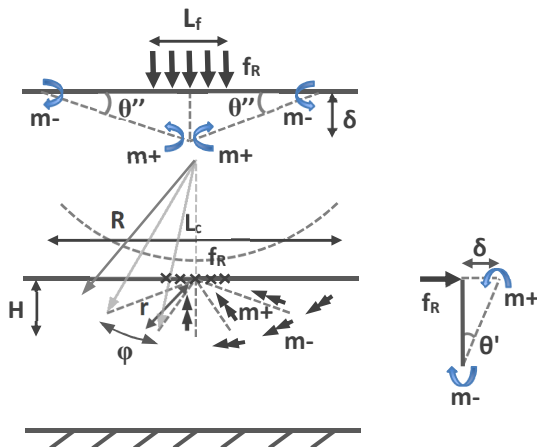


$R = 1,731 \text{ m}$   
 Por  $H = 0,5 \text{ m}$ :  $\varphi = 89^\circ$ ,  $L_c = 2,4 \text{ m}$   
 Por  $H = 0,2 \text{ m}$ :  $\varphi = 56^\circ$ ,  $L_c = 1,6 \text{ m}$

Cálculo líneas de rotura propuestas:

$$F_R = m^+ \cdot \varphi + m^- \cdot \varphi \cdot \frac{R}{r} = \varphi \cdot \left( m^+ + m^- \cdot \frac{R}{r} \right)$$

## A8.2.15- Caso 10



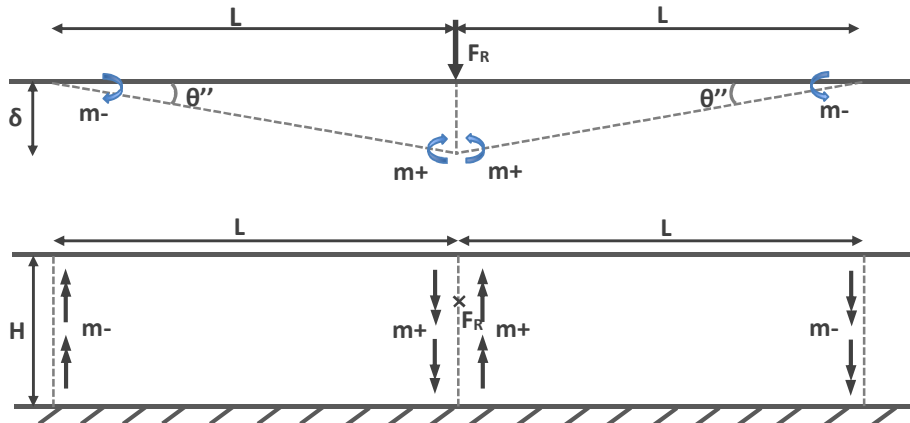
$R = 1,731 \text{ m}$   
 Por  $H = 0,5 \text{ m}$ :  $\varphi = 89^\circ$ ,  $L_c = 2,4 \text{ m}$   
 Por  $H = 0,2 \text{ m}$ :  $\varphi = 56^\circ$ ,  $L_c = 1,6 \text{ m}$

Cálculo líneas de rotura propuestas:

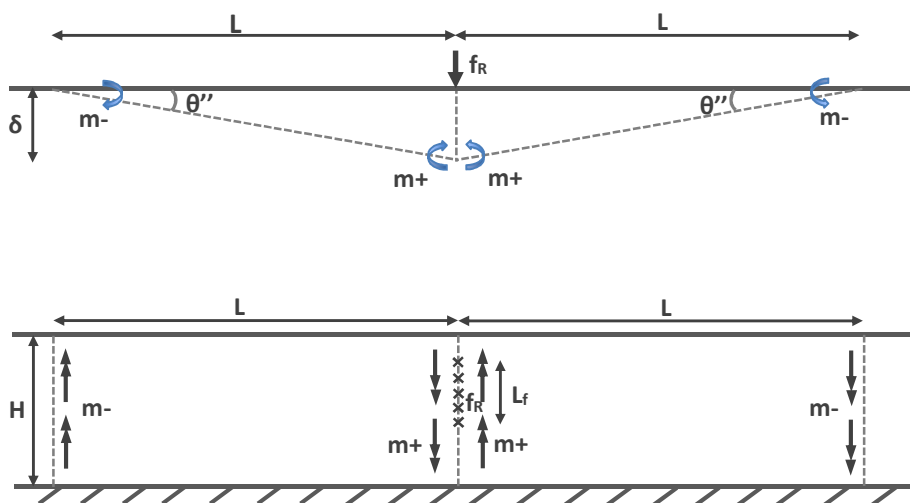
$$F_R = f_R \cdot L_f = \left( \frac{1}{1 - \frac{L_f}{2 \cdot L_c}} \right) \cdot \left( m^+ \cdot \varphi + m^- \cdot \varphi \cdot \frac{R}{r} \right) = \left( \frac{\varphi}{1 - \frac{L_f}{2 \cdot L_c}} \right) \cdot \left( m^+ + m^- \cdot \frac{R}{r} \right)$$

## A8.2.16- Casos 22, 30

## Carga puntual



## Carga lineal



Cálculo con carga puntual:

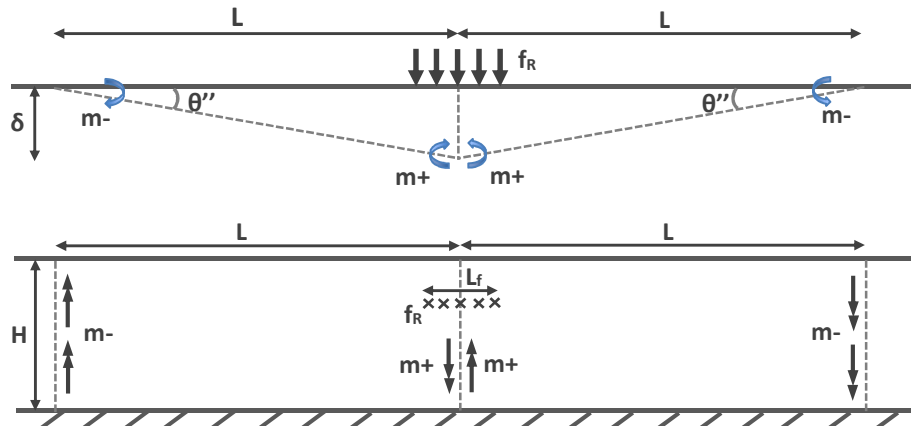
$$F_R = 2 \cdot \frac{H}{L} \cdot (m^+ + m^-)$$

Cálculo con carga lineal:

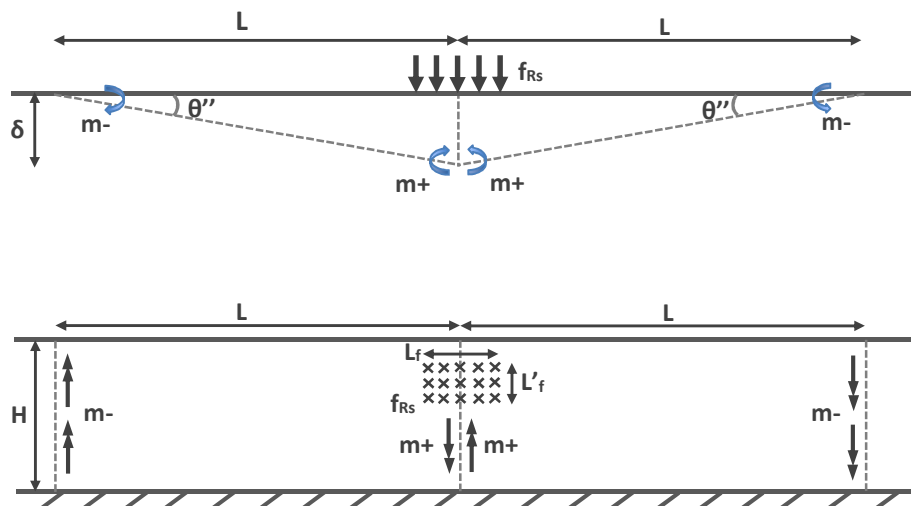
$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{4 \cdot H}{L \cdot \left(2 - \frac{L_f}{L}\right)} \cdot (m^+ + m^-)$$

## A8.2.17- Casos 23, 31

## Carga lineal



## Carga superficial



Cálculo con carga lineal:

$$F_R = f_R \cdot L_f = \frac{4 \cdot H}{L \cdot \left(2 - \frac{L_f}{L}\right)} \cdot (m^+ + m^-)$$

Cálculo con carga superficial:

$$F_R = f_{RS} \cdot L_f \cdot L'_f = \frac{4 \cdot H}{L \cdot \left(2 - \frac{L_f}{L}\right)} \cdot (m^+ + m^-)$$

### A8.3.- PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se presentan los principales resultados obtenidos de cada caso. Entre ellos, se muestran los valores de carga de cada subcaso con hormigón en masa (HM), con hormigón con las dos barras longitudinales ( $2\phi 12$ ), con 3 barras ( $3\phi 12$ ) y con fibras de polipropileno y de acero. También se expone la forma geométrica de rotura y la posibilidad de sustitución de las  $2\phi 12$  por fibras de polipropileno o de acero y su cuantía si es posible.

#### A8.3.1- Cargas de rotura de los casos con el perfil 51

Subcaso	HM	$2\phi 12$	$3\phi 12$	Fibras de polipropileno		Fibras de acero	
				2 Kg/m <sup>3</sup>	12 Kg/m <sup>3</sup>	15 Kg/m <sup>3</sup>	35 Kg/m <sup>3</sup>
1.1 S	125	165,3	187	138,6	159,4	139	149
1.2 S	85,6	125,6	125,6	95,3	109,9	95,3	102,9
1.1 D	170,4	211,8	235,4	188,5	216,2	189,2	202,5
1.2 D	100,7	141,7	141,7	112	129	112,3	120,6
2.1 S	128,1	164,7	185,5	142,9	166,4	143,3	154,9
2.2 S	153,4	183,4	201,3	172,1	201,6	172,6	187,3
2.3 S	190,1	214,4	229,5	214,1	251,7	214,8	233,6
2.4 S	99,5	127,5	127,5	114,7	138	114,7	127,2
2.5 S	155,5	173,1	173,1	181	220,2	181	201,9
2.6 S	219,7	232,1	232,1	256,4	312,9	256,4	286,7
2.1 D	184	221,4	243,6	203,5	235	204,4	219,7
2.2 D	227,8	258,4	277,1	252,4	291,9	253,5	273
2.3 D	287,3	311,8	327,4	318,8	369,1	320,2	345,1
2.4 D	126,3	154,7	154,7	144,0	171,1	144,4	158,1
2.5 D	201,4	219,1	219,1	231	276,7	231,7	254,9
2.6 D	286,2	298,7	298,7	328,9	394,6	329,9	363,3
3.1 S	111,1	129	141	122	141,2	122,3	131,6
3.2 S	82,4	94,4	94,4	87,3	95,8	87,3	91,7
3.1 D	151,6	169,5	181,5	165,8	191,5	166,5	178,7
3.2 D	96,9	108,9	108,9	102,6	112,4	102,7	107,6
4.1 S	156,2	206,6	233,7	173,3	199,3	173,7	186,3
4.2 S	208,3	275,4	311,6	231	265,7	231,6	248,4
4.1 D	213,1	264,7	294,2	235,6	270,3	236,5	253,1
4.2 D	284,1	353	392,3	314,2	360,3	315,4	337,5

Tabla A8.2. Cargas de rotura de los casos 1 - 4. (unidades en kN).



Subcaso	HM	2 $\phi$ 12	3 $\phi$ 12	Fibras de polipropileno		Fibras de acero	
				2 Kg/m <sup>3</sup>	12 Kg/m <sup>3</sup>	15 Kg/m <sup>3</sup>	35 Kg/m <sup>3</sup>
5.1 S	150,6	193,7	218,9	169,5	200,4	170,1	185,8
5.2 S	181,7	215,4	236	207	247,8	207,9	228,3
5.3 S	229,4	255,6	272,1	262,1	317,8	263,3	290,3
5.4 S	182,1	235,9	267,5	208,9	252,5	209,6	231,4
5.5 S	226,9	264,7	288,3	262,8	321,9	263,6	293,4
5.6 S	293,9	321,8	339,8	341,2	423,2	342,3	382,9
5.1 D	216,3	261,5	288	242,4	284,3	243,2	264,7
5.2 D	271,1	305,5	326,8	305,3	365,1	306,4	335,8
5.3 D	347,8	374,2	391,1	392,2	468	393,5	430,9
5.4 D	263,9	319,1	352,5	300,3	359,9	301,4	331,3
5.5 D	340,5	378,9	403,1	389,9	473,6	391,2	432,5
5.6 D	447,4	475,5	493,7	512,7	626,4	514,4	570,7
6.1 S	160,6	199,7	233,7	173,1	194,1	173,4	183,6
6.2 S	202,8	240,3	259,6	214,2	234,3	214,5	224,3
6.3 S	250,8	283,9	306	260,9	278,7	261,2	269,8
6.4 S	154,7	190,2	190,2	163,7	175,8	163,7	170,3
6.5 S	244,4	277,3	277,3	251,1	262,7	251,1	257,1
6.6 S	344,2	364,5	364,5	348,5	355,6	348,5	352,2
6.1 D	219	259	282	235,5	263,5	236,2	249,6
6.2 D	276	314,1	337	291,6	318,4	292,3	305
6.3 D	342,2	375,2	397,5	355,3	379	356	367,3
6.4 D	182	218	218	192,5	206,5	192,7	199,9
6.5 D	287,5	320,4	320,4	295,3	308,8	295,5	302,1
6.6 D	404,9	425,2	425,2	409,9	418,1	410	414,1
7.1 S	175,7	216	237,7	189,4	210,2	189,7	199,8
7.2 S	226,5	266,8	288,5	240,1	261	240,5	250,5
7.3 S	277,2	317,5	339,2	303,8	311,7	303,8	301,3
7.4 S	155,1	195,1	195,1	164,8	179,4	164,8	172,4
7.5 S	224,6	264,6	264,6	234,3	248,9	234,3	241,8
7.6 S	294,1	334	334	303,8	318,4	303,8	311,3
7.1 D	249	290,3	313,9	267	294,7	267,7	281
7.2 D	327,5	368,9	392,4	345,6	373,3	346,3	359,6
7.3 D	406,7	447,4	471,0	424,1	451,8	424,8	438,1
7.4 D	191,7	232,7	232,7	203	220,0	203,3	211,6
7.5 D	282,7	323,7	323,7	294	311	294,3	302,6
7.6 D	373,7	414,7	414,7	385	402	385,3	393,6

Tabla A8.3. Cargas de rotura de los casos 5 - 7. (unidades en kN).

Subcaso	HM	2 $\phi$ 12	3 $\phi$ 12	Fibras de polipropileno		Fibras de acero	
				2 Kg/m <sup>3</sup>	12 Kg/m <sup>3</sup>	15 Kg/m <sup>3</sup>	35 Kg/m <sup>3</sup>
8.1 S	178,8	215,5	236,2	193,7	217,2	194,1	205,7
8.2 S	229,6	266,2	287	244,4	267,9	244,8	256,4
8.3 S	280,4	317,0	337,7	295,2	318,7	295,6	307,2
8.4 S	169	196,9	196,9	184,2	207,5	184,2	196,6
8.5 S	238,5	266,4	266,4	253,7	277	253,7	266,1
8.6 S	308	335,9	335,9	323,2	346,4	323,2	335,6
8.1 D	262,5	300	322,1	282	313,5	282,9	298,3
8.2 D	341,1	378,5	400,6	360,6	392	361,5	376,8
8.3 D	419,6	457	479,2	439,1	470,6	440	455,3
8.4 D	217,3	245,7	245,7	235,0	262,1	235,4	249,1
8.5 D	308,4	336,7	336,7	326	353,1	326,4	340,1
8.6 D	399,4	427,7	427,7	417	444,1	417,4	431,1
9.1 S	183,2	213,5	231,5	202,1	231,8	202,6	217,6
9.2 S	251,6	275,9	291,2	275,6	313,5	276,2	295,1
9.3 S	326,2	346,2	358,9	356,0	403,0	356,8	380,1
9.4 S	197,5	216	216	224,2	264,8	224,2	246
9.5 S	307,1	320,4	320,4	346,1	405	346,1	377,8
9.6 S	420,5	430,6	430,6	471,6	550,3	471,6	513,1
9.1 D	271,7	302,2	321	296,3	335,7	297,4	317
9.2 D	378,6	402,8	418,3	409,3	459,6	411	435,5
9.3 D	494,6	514	526,7	532,8	593,7	534,5	546,3
9.4 D	255,3	273,7	273,7	285,9	332,6	286,6	310,4
9.5 D	398,5	411,4	411,4	442,5	510,3	443,5	477,9
9.6 D	546	556,2	556,2	604,3	693,8	605,7	650,1
10.1 S	124,0	144,0	157,4	136,2	157,7	136,5	146,9
10.2 S	140,3	163,0	178,2	154,1	178,4	154,5	166,2
10.3 S	161,6	187,7	205,2	177,4	205,4	177,9	191,4
10.4 S	97,6	111,9	111,9	103,4	113,5	103,4	108,6
10.5 S	119,8	137,3	137,3	126,9	139,3	126,9	133,3
10.6 S	155,0	177,7	177,7	164,2	180,3	164,2	172,5
10.1 D	169,2	189,2	202,6	185,1	213,7	185,8	199,5
10.2 D	191,4	214,1	229,3	209,5	241,9	210,3	225,8
10.3 D	220,4	246,5	264,0	241,2	278,5	242,1	260,0
10.4 D	114,8	129,1	129,1	121,6	133,3	121,7	127,5
10.5 D	140,9	158,5	158,5	149,2	163,5	149,4	156,4
10.6 D	182,4	205,1	205,1	193,1	211,6	193,3	202,5

Tabla A8.4. Cargas de rotura de los casos 8 - 10. (unidades en kN).

Subcaso	HM	2 $\phi$ 12	3 $\phi$ 12	Fibras de polipropileno		Fibras de acero	
				2 Kg/m <sup>3</sup>	12 Kg/m <sup>3</sup>	15 Kg/m <sup>3</sup>	35 Kg/m <sup>3</sup>
11.1 S	212,8	260,7	288	228,5	254,2	228,9	242,4
11.2 S	282,2	325,7	351,2	298	319,7	298,4	309,5
11.3 S	362,3	400,7	422,1	376,8	395,6	377,2	387,1
11.4 S	312,9	375,1	411,8	334,4	365,8	334,9	350,1
11.5 S	444,6	503,3	532,2	462,4	494	462,9	478,2
11.6 S	594,4	645,8	678	610	637,6	610	623,8
11.1 D	290,2	340,8	368,1	310,8	345,4	311,8	329,5
11.2 D	384,9	430,5	455,9	405,7	434,8	406,6	421,4
11.3 D	494,1	535	556,4	513,2	538,6	514,1	527,4
11.4 D	426,8	490,4	529,6	455,2	497	456,3	476,4
11.5 D	606,5	665,1	701,5	629,9	671,8	631	651,1
11.6 D	810,8	862,2	896,7	831,3	868	832,2	849,9
12.1 S	196,2	240,6	266,4	216,1	247,8	216,8	232,9
12.2 S	271,8	306,3	327,6	302,3	356,6	303,4	329,8
12.3 S	362,9	390,0	406,9	414,0	505,2	415,9	460,2
12.4 S	254	310,7	343,1	283,1	329	283,7	307
12.5 S	359,6	401,2	426,7	411	502,2	412,2	457,3
12.6 S	486,9	518,4	538,4	566,4	707,4	568,3	638
12.1 D	282,4	327,8	354	308,9	351,5	309,7	331,7
12.2 D	403	437,5	458,9	445	519,2	446,3	483,0
12.3 D	545,3	572,4	588,9	614,8	739,4	617	678,4
12.4 D	367,1	424,2	458,4	406,2	468,9	407,3	439,2
12.5 D	535,7	577,2	602,7	606,3	732,2	608,4	670,4
12.6 D	734,5	765,9	785,2	843,7	1038,2	846,8	942,7
13.1 S	213,5	257,2	282,3	292,3	372,8	294,8	359,1
13.2 S	276,9	320,6	345,8	386,3	500,6	390,1	481,3
13.3 S	340,4	384,1	409,2	480,4	628,4	485,5	603,5
13.4 S	266,7	320,5	352,1	339,1	418,7	340,8	402,5
13.5 S	351,3	405,1	436,7	449,9	560,8	452,1	536,7
13.6 S	435,9	489,7	521,3	560,8	702,9	563,4	670,9
13.1 D	314,5	359,7	386,2	410,2	510,6	413,7	493,9
13.2 D	412,7	457,8	484,3	544	683,8	548,7	660,1
13.3 D	510,8	556	582,5	677,8	857	683,8	826,4
13.4 D	394,8	450	483,4	488,5	589,3	491,5	572,7
13.5 D	525,7	580,9	614,3	652,8	789,8	656,5	767,4
13.6 D	656,6	711,7	745,2	817	990,3	821,6	962

Tabla A8.5. Cargas de rotura de los casos 11 - 13. (unidades en kN).

Subcaso	HM	2 $\phi$ 12	3 $\phi$ 12	Fibras de polipropileno		Fibras de acero	
				2 Kg/m <sup>3</sup>	12 Kg/m <sup>3</sup>	15 Kg/m <sup>3</sup>	35 Kg/m <sup>3</sup>
14.1 S	219,6	270	297,2	324,3	434	327,4	415,4
14.2 S	283,1	333,5	360,6	418,4	561,9	422,7	537,6
14.3 S	346,5	396,9	424,4	512,4	689,7	518,0	659,8
14.4 S	292,9	360	396,2	390,3	495,6	393	474,4
14.5 S	377,4	444,6	480,8	501,1	637,7	504,1	608,6
14.6 S	462	529,2	565,4	612	779,8	615,45	742,8
14.1 D	311,2	362,9	392,4	435,4	568,9	440,5	545,8
14.2 D	409,4	461,1	490,6	569,2	742,1	575,5	712,6
14.3 D	507,6	559,2	588,7	703	915,2	710,6	878,4
14.4 D	415,0	483,9	523,2	538,1	669,9	542,7	648,0
14.5 D	545,9	614,8	654,1	702,4	870,4	707,8	842,6
14.6 D	676,8	745,7	785	866,6	1070,9	872,9	1037,3
15.1 S	219,6	270	297,2	236,7	262,7	237,2	249,7
15.2 S	283,1	333,5	360,6	300,2	326,2	300,6	313,2
15.3 S	346,5	396,9	424,4	363,6	389,6	364	376,6
15.4 S	292,9	360	396,2	315,6	350,3	316,2	333
15.5 S	377,4	444,6	480,8	400,2	434,9	400,8	417,6
15.6 S	462	529,2	565,4	484,8	519,5	485,4	502,2
15.7 S	310,2	390,2	390,2	329,6	358,8	329,6	344,7
15.8 S	449,2	529,1	529,1	468,6	497,8	468,6	483,7
15.9 S	588,1	668,1	668,1	607,6	636,8	607,6	622,7
15.1 D	311,2	362,9	392,4	333,8	368,4	334,7	351,3
15.2 D	409,4	461,1	490,6	432	466,6	432,9	449,5
15.3 D	507,6	559,2	588,7	530,1	564,8	531	547,6
15.4 D	415	483,9	523,2	445,1	491,2	446,2	468,4
15.5 D	545,9	614,8	654,1	576	622,1	577,1	599,3
15.6 D	676,8	745,7	785	706,9	753	708	730,2
15.7 D	383,5	465,4	465,4	406	432,6	406,5	423,2
15.8 D	565,5	647,4	647,4	588,1	614,6	588,5	605,2
15.9 D	747,5	829,4	829,4	770,1	796,6	770,5	787,2

Tabla A8.6. Cargas de rotura de los casos 14 - 15. (unidades en kN).

### A8.3.2- Forma de rotura y sustitución de los 2 $\phi$ 12 por fibras casos perfil 51

Subcaso	Forma geométrica de rotura		Sustitución de los 2 $\phi$ 12 por fibras	
	L <sub>c</sub> (m)	$\alpha_R$ (°)	Polipropileno (Kg/m <sup>3</sup> )	Acero (Kg/m <sup>3</sup> )
1.1 S	1 - 1,4	35 - 45	No	No
1.2 S	0,4 - 0,6	35 - 45	No	No
1.1 D	1 - 1,4	35 - 45	10,4	No
1.2 D	0,4 - 0,6	35 - 45	No	No
2.1 S	1,1 - 1,5	45 - 60	11,3	No
2.2 S	1,4 - 1,8	50 - 70	5,7	29,1
2.3 S	1,8 - 2,3	50 - 75	2	15
2.4 S	0,6 - 0,8	50 - 70	7,1	35
2.5 S	1,1 - 1,4	45 - 75	2	15
2.6 S	1,6 - 2	40 - 80	2	15
2.1 D	1,1 - 1,5	45 - 60	7,5	35
2.2 D	1,4 - 1,8	50 - 70	3,4	19,7
2.3 D	1,8 - 2,3	50 - 75	2	15
2.4 D	0,6 - 0,8	50 - 70	7,7	29,8
2.5 D	1,1 - 1,4	45 - 80	2	15
2.6 D	1,5 - 2	40 - 85	2	15
3.1 S	2,4	-	5,7	27
3.2 S	1,6	-	10,4	No
3.1 D	2,4	-	3,5	19,8
3.2 D	1,6	-	8	No
4.1 S	1 - 1,4	35 - 45	No	No
4.2 S	1 - 1,4	35 - 45	No	No
4.1 D	1 - 1,4	35 - 45	10,4	No
4.2 D	1 - 1,4	35 - 45	10,4	No
5.1 S	1 - 1,5	45 - 65	9,7	No
5.2 S	1,4 - 1,7	55 - 70	4	22
5.3 S	1,8 - 2	60 - 75	2	15
5.4 S	1 - 1,3	50 - 65	8	No
5.5 S	1,3 - 1,6	60 - 75	2	15
5.6 S	1,7 - 1,9	70 - 80	2	15
5.1 D	1,1 - 1,3	50 - 60	6,3	31,9
5.2 D	1,4 - 1,6	60 - 70	2	15
5.3 D	1,8 - 2	65 - 75	2	15
5.4 D	1 - 1,2	50 - 65	5	26,3
5.5 D	1,3 - 1,5	65 - 75	2	15
5.6 D	1,7 - 1,9	70 - 80	2	15

Tabla A8.7. Forma de rotura y posibilidad de sustitución de los 2 $\phi$ 12 de los casos 1 - 5.

Subcaso	Forma geométrica de rotura		Sustitución de los 2 $\phi$ 12 por fibras	
	L <sub>c</sub> (m)	$\alpha_R$ (°)	Polipropileno (Kg/m <sup>3</sup> )	Acero (Kg/m <sup>3</sup> )
6.1 S	1,2 - 1,7	30 - 40	No	No
6.2 S	1,7 - 2,1	25 - 30	No	No
6.3 S	2,1 - 2,7	20 - 25	No	No
6.4 S	0,7 - 0,9	25 - 30	No	No
6.5 S	1,1	20	No	No
6.6 S	1,5 - 1,7	13 - 15	No	No
6.1 D	1,2 - 1,7	30 - 40	10,4	No
6.2 D	1,7 - 2,1	25 - 30	10,4	No
6.3 D	1,2 - 1,7	30 - 40	10,4	No
6.4 D	0,7 - 0,9	25 - 30	No	No
6.5 D	1,1	20	No	No
6.6 D	0,7 - 0,9	25 - 30	No	No
7.1 S	1,5 - 1,9	35 - 45	No	No
7.2 S	2 - 2,4	35 - 45	No	No
7.3 S	2,5 - 2,9	35 - 45	No	No
7.4 S	0,9 - 1,1	35 - 45	No	No
7.5 S	1,4 - 1,6	35 - 45	No	No
7.6 S	1,9 - 2,1	35 - 45	No	No
7.1 D	1,5 - 1,9	35 - 45	10,4	No
7.2 D	2 - 2,4	35 - 45	10,4	No
7.3 D	2,5 - 2,9	35 - 45	10,4	No
7.4 D	0,9 - 1,1	35 - 45	No	No
7.5 D	1,4 - 1,6	35 - 45	No	No
7.6 D	1,9 - 2,1	35 - 45	No	No
8.1 S	1,6 - 2	45 - 60	11,3	No
8.2 S	2,1 - 2,5	45 - 60	11,3	No
8.3 S	2,6 - 3	45 - 60	11,3	No
8.4 S	1,1 - 1,3	55 - 70	7,1	35
8.5 S	1,6 - 1,8	55 - 70	7,1	35
8.6 S	2,1 - 2,3	55 - 70	7,1	35
8.1 D	1,6 - 2	45 - 60	7,5	35
8.2 D	2,1 - 2,5	45 - 60	7,5	35
8.3 D	2,6 - 3	45 - 60	7,5	35
8.4 D	1,1 - 1,3	55 - 70	5,7	29,6
8.5 D	1,6 - 1,8	55 - 70	5,7	29,6
8.6 D	2,1 - 2,3	55 - 70	5,7	29,6

Tabla A8.8. Forma de rotura y posibilidad de sustitución de los 2 $\phi$ 12 de los casos 6 - 8.

Subcaso	Forma geométrica de rotura		Sustitución de los 2 $\phi$ 12 por fibras	
	L <sub>c</sub> (m)	$\alpha_R$ (°)	Polipropileno (Kg/m <sup>3</sup> )	Acero (Kg/m <sup>3</sup> )
9.1 S	1,8 - 2	40 - 45	5,6	29,1
9.2 S	2,5 - 2,7	40 - 45	2	15
9.3 S	3,2 - 3,7	30 - 40	2	15
9.4 S	1,4 - 1,6	35 - 45	2	15
9.5 S	2,2 - 2,4	25 - 30	2	15
9.6 S	2,9 - 3,1	20 - 25	2	15
9.1 D	1,8 - 2	45 - 50	3,4	19,7
9.2 D	2,5 - 2,9	35 - 45	2	15
9.3 D	3,2 - 3,7	30 - 40	2	15
9.4 D	1,4 - 1,6	35 - 45	2	15
9.5 D	2,2 - 2,4	25 - 30	2	15
9.6 D	2,9 - 3,5	15 - 25	2	15
10.1 S	2,4	-	5,7	29,1
10.2 S	2,4	-	5,7	29,1
10.3 S	2,4	-	5,7	29,1
10.4 S	1,6	-	10,4	No
10.5 S	1,6	-	10,4	No
10.6 S	1,6	-	10,4	No
10.1 D	2,4	-	3,5	19,7
10.2 D	2,4	-	3,5	19,7
10.3 D	2,4	-	3,5	19,7
10.4 D	1,6	-	8,3	No
10.5 D	1,6	-	8,3	No
10.6 D	1,6	-	8,3	No
11.1 S	1,4 - 1,7	30 - 35	No	No
11.2 S	1,7 - 2,1	25 - 30	No	No
11.3 S	2,1 - 2,7	20 - 25	No	No
11.4 S	1,4 - 2,1	25 - 35	No	No
11.5 S	2,1 - 2,7	20 - 25	No	No
11.6 S	2,7 - 3,7	15 - 20	No	No
11.1 D	1,4 - 1,7	30 - 35	10,4	No
11.2 D	1,7 - 2,1	25 - 30	10,4	No
11.3 D	2,1 - 2,7	20 - 25	10,4	No
11.4 D	1,4 - 1,7	30 - 35	10,4	No
11.5 D	2,1 - 2,7	20 - 25	10,4	No
11.6 D	2,7	20	10,4	No

Tabla A8.9. Forma de rotura y posibilidad de sustitución de los 2 $\phi$ 12 de los casos 9 - 11.

Subcaso	Forma geométrica de rotura		Sustitución de los 2 $\phi$ 12 por fibras	
	L <sub>c</sub> (m)	$\alpha_R$ (°)	Polipropileno (Kg/m <sup>3</sup> )	Acero (Kg/m <sup>3</sup> )
12.1 S	1,3 - 1,7	40 - 50	9,5	No
12.2 S	1,8 - 2,2	40 - 50	2,8	17,1
12.3 S	2,5 - 2,7	40 - 45	2	15
12.4 S	1,3 - 1,5	45 - 50	8	No
12.5 S	1,8 - 2,2	40 - 50	2	15
12.6 S	2,7	40	2	15
12.1 D	1,3 - 1,7	40 - 50	6,1	31,3
12.2 D	2 - 2,2	40 - 45	2	15
12.3 D	2,7	40	2	15
12.4 D	1,3 - 1,7	40 - 50	4,8	25,4
12.5 D	2 - 2,2	40 - 45	2	15
12.6 D	2,7	40	2	15
13.1 S	1,4 - 2	45 - 70	2	15
13.2 S	1,9 - 2,5	45 - 70	2	15
13.3 S	2,4 - 3	45 - 70	2	15
13.4 S	1,4 - 1,8	50 - 70	2	15
13.5 S	1,9 - 2,3	50 - 70	2	15
13.6 S	2,4 - 2,8	50 - 70	2	15
13.1 D	1,4 - 1,8	50 - 70	2	15
13.2 D	1,9 - 2,3	50 - 70	2	15
13.3 D	2,4 - 2,8	50 - 70	2	15
13.4 D	1,4 - 1,8	50 - 70	2	15
13.5 D	1,9 - 2,3	50 - 70	2	15
13.6 D	2,4 - 2,8	50 - 70	2	15
14.1 S	1,3 - 1,9	35 - 50	2	15
14.2 S	1,8 - 2,4	35 - 50	2	15
14.3 S	2,3 - 2,9	35 - 50	2	15
14.4 S	1,3 - 1,9	35 - 50	2	15
14.5 S	1,8 - 2,4	35 - 50	2	15
14.6 S	2,3 - 2,9	35 - 50	2	15
14.1 D	1,3 - 1,9	35 - 50	2	15
14.2 D	1,8 - 2,4	35 - 50	2	15
14.3 D	2,3 - 2,9	35 - 50	2	15
14.4 D	1,5 - 1,9	35 - 45	2	15
14.5 D	2 - 2,4	35 - 45	2	15
14.6 D	2,5 - 2,9	35 - 45	2	15

Tabla A8.10. Forma de rotura y posibilidad de sustitución de los 2 $\phi$ 12 de los casos 12 - 14.



Subcaso	Forma geométrica de rotura		Sustitución de los 2 $\phi$ 12 por fibras	
	L <sub>c</sub> (m)	$\alpha_R$ (°)	Polipropileno (Kg/m <sup>3</sup> )	Acero (Kg/m <sup>3</sup> )
15.1 S	1,5 – 1,9	35 - 45	No	No
15.2 S	2 – 2,4	35 - 45	No	No
15.3 S	2,5 – 2,9	35 - 45	No	No
15.4 S	1,5 – 1,9	35 - 45	No	No
15.5 S	2 – 2,4	35 - 45	No	No
15.6 S	2,5 – 2,9	35 - 45	No	No
15.7 S	0,9 – 1,1	35 - 45	No	No
15.8 S	1,4 – 1,5	40 - 45	No	No
15.9 S	1,9 – 2,1	35 - 45	No	No
15.1 D	1,5 – 1,9	35 - 45	10,4	No
15.2 D	2 – 2,4	35 - 45	10,4	No
15.3 D	2,5 – 2,9	35 - 45	10,4	No
15.4 D	1,5 – 1,9	35 - 45	10,4	No
15.5 D	2 – 2,4	35 - 45	10,4	No
15.6 D	2,5 – 2,9	35 - 45	10,4	No
15.7 D	0,9 – 1,1	35 - 45	No	No
15.8 D	1,4 – 1,6	35 - 45	No	No
15.9 D	1,9 – 2,1	35 - 45	No	No

Tabla A8.11. Forma de rotura y posibilidad de sustitución de los 2 $\phi$ 12 del caso 15.

### A8.3.3- Casos de los perfiles 122 y 123

Subcaso	Carga (kN)	Forma geométrica		Subcaso	Carga (kN)	Forma geométrica	
		L <sub>c</sub> (m)	$\alpha_R$ (°)			L <sub>c</sub> (m)	$\alpha_R$ (°)
16.1 S	131,2	1	45	24.1 S	170,4	1,4	35
16.2 S	88,8	0,4	45	24.2 S	111,8	0,5 - 0,6	35 - 40
16.1 D	180,2	1	45	24.1 D	218	1,2	40
16.2 D	105,1	0,4	45	24.2 D	127,1	0,5	40
17.1 S	163,9	1	45	25.1 S	213	1,4	35
17.2 S	218,6	1	45	25.2 S	284,1	1,4	35
17.1 D	225,3	1	45	25.1 D	272,5	1,2	40
17.2 D	300,4	1	45	25.2 D	363,3	1,2	40

Tabla A8.12. Carga y forma geométrica de rotura de los casos 16 - 17.

Subcaso	Carga (kN)	Forma geométrica		Subcaso	Carga (kN)	Forma geométrica	
		L <sub>c</sub> (m)	α <sub>R</sub> (°)			L <sub>c</sub> (m)	α <sub>R</sub> (°)
18.1 S	164,1	1,1	60	26.1 S	190,9	1,3	50
18.2 S	203,7	1,5	65	26.2 S	213,2	1,6	60
18.3 S	260	1,9	70	26.3 S	253,7	1,9	70
18.4 S	201,9	1,1	60	26.4 S	220,7	1,2	55
18.5 S	258,3	1,4	70	26.5 S	253,6	1,4	70
18.6 S	338,4	1,8	75	26.6 S	313,4	1,8	75
18.1 D	236,4	1,1	60	26.1 D	258,3	1,2	55
18.2 D	301,5	1,5	65	26.2 D	303,1	1,5	65
18.3 D	389,8	1,9	70	26.3 D	372,3	1,9	70
18.4 D	292,1	1,1	60	26.4 D	303,1	1,1	60
18.5 D	384,5	1,4	70	26.5 D	367,4	1,4	70
18.6 D	509,3	1,9	70	26.6 D	467	1,8	75
19.1 S	166,5	1,4	35	27.1 S	204,7	1,7	30
19.2 S	207,9	1,7	30	27.2 S	245,2	2,1	25
19.3 S	255,3	2,1	25	27.3 S	289,2	2,1	25
19.4 S	157,6	0,7	30	27.4 S	177,2	0,9	25
19.5 S	246,6	1,1	20	27.5 S	264,2	1,1	20
19.6 S	345,7	1,7	13	27.6 S	356,5	1,7	13
19.1 D	228,2	1,4	35	27.1 D	265,3	1,4	35
19.2 D	284,6	1,7	30	27.2 D	320,1	1,7	30
19.3 D	349,2	2,1	25	27.3 D	380,5	2,1	25
19.4 D	186	0,7	30	27.4 D	205,1	0,9	25
19.5 D	290,5	1,1	20	27.5 D	307,3	1,1	20
19.6 D	407	1,7	13	27.6 D	417,2	1,7	13
20.1 S	219,7	1,4	35	28.1 S	267,2	1,7	30
20.2 S	289,2	1,7	30	28.2 S	331,8	2,1	25
20.3 S	368,7	2,1	25	28.3 S	405,8	2,7	20
20.4 S	323,1	1,4	35	28.4 S	384,4	1,7	30
20.5 S	452,5	2,1	25	28.5 S	506,3	2,5	22
20.6 S	601,3	2,7	20	28.6 S	645,4	3,1	18
20.1 D	301,2	1,4	35	28.1 D	347,3	1,7	30
20.2 D	396	1,7	30	28.2 D	436,5	2,1	25
20.3 D	504,3	2,1	25	28.3 D	540,1	2,7	20
20.4 D	443	1,4	35	28.4 D	499,7	1,7	30
20.5 D	619	2,1	25	28.5 D	674,5	2,1	25
20.6 D	821,7	2,7	20	28.6 D	870,4	2,7	20

Tabla A8.13. Carga y forma geométrica de rotura de los casos 18 - 20.

Subcaso	Carga (kN)	Forma geométrica		Subcaso	Carga (kN)	Forma geométrica	
		L <sub>c</sub> (m)	α <sub>R</sub> (°)			L <sub>c</sub> (m)	α <sub>R</sub> (°)
21.1 S	212	1,3 - 1,5	45 - 50	29.1 S	246,7	1,7	40
21.2 S	300	2	45	29.2 S	311,4	2,2	40
21.3 S	409,1	2,7	40	29.3 S	394,3	2,7	40
21.4 S	276,6	1,3	50	29.4 S	318,6	1,7	40
21.5 S	405,2	2	45	29.5 S	407,3	2,2	40
21.6 S	559	2,7	40	29.6 S	523,4	2,7	40
21.1 D	304,1	1,5	45	29.1 D	334,4	1,7	40
21.2 D	441,6	2	45	29.2 D	442,6	2,2	40
21.3 D	609,3	2,7	40	29.3 D	576,4	2,9	35
21.4 D	399	1,3	50	29.4 D	432,9	1,5	45
21.5 D	599,7	2	45	29.5 D	583,3	2,2	40
21.6 D	836,4	2,7	40	29.6 D	770,5	2,9	35
22.1 S	29,1	-	-	30.1 S	48,0	-	-
22.1 D	42,4	-	-	30.1 D	68,7	-	-
23.1 S	29,7	-	-	31.1 S	49,3	-	-
23.2 S	30,4	-	-	31.2 S	50,7	-	-
23.3 S	31,1	-	-	31.3 S	52,2	-	-
23.1 D	43,4	-	-	31.1 D	70,7	-	-
23.2 D	44,5	-	-	31.2 D	72,8	-	-
23.3 D	45,7	-	-	31.3 D	75,1	-	-

Tabla A8.14. Carga y forma geométrica de rotura de los casos 21 - 23.

#### A8.4.- CÁLCULO A PUNZONAMIENTO

Parámetro	Valor	Unidades
F	119,2	kN
d <sub>h</sub>	50 - 300	mm
u <sub>1</sub> , u <sub>2</sub>	u <sub>1</sub> = u <sub>2</sub> = 50	mm
u	$2 \cdot \pi \cdot (u_{1,2} + 4 \cdot d_h) / 2$	mm
f <sub>ck</sub>	30	MPa
γ <sub>c</sub>	1,5	-
τ <sub>sd</sub>	F / (u · d <sub>h</sub> )	MPa
τ <sub>rd</sub>	0,94	MPa
τ <sub>rd,min</sub>	0,75	MPa

Tabla A8.15. Datos del cálculo a punzonamiento.

## ANEJO 9

# Ensayos experimentales del hormigón empleado en las barreras



## A9.1.- PERFIL INICIAL (R2)

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey.</b>		
Fecha: 17/04/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 1/7

## Descripción de las muestras de ensayo:


Peticionario	Antonio Aguado
Tipo de muestras	Extracción de testigos de dos fragmentos de New Jersey.
Material	Hormigón
Número de muestras	Extracción de un total de 18 testigos, 10 del fragmento A, muestras de la 1 a la 10, y 8 del fragmento B, muestras de la 11 a la 18 (ver figura 1).
Extracciones no válidas	Testigo 1 (fragmento A) por tener un plano de fisura que lo atraviesa.
Día de extracción	Jueves 15 de marzo de 2012.
Operarios	Camilo Bernad y Robert M. Mc-Aloon.
Lugar de extracción	Circuito de Idiada, L'Albomar (Tarragona).
Ø broca	100 mm exterior; 93,1 mm interior.
Longitud:	Variable



Figura 1. Ubicación extracciones en fragmento A.





Figura 2. Ubicación extracciones en fragmento B.

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey.</b>		
Fecha: 17/04/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 2/7

**Determinación de la resistencia a compresión:**


Datos del ensayo				
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W			
Nº Fabricación	211778			
Control de ensayo	Fuerza			
Escala	1/5 (600 kN) clase 1.			
Velocidad	3,9 kN/s			
Registro deformación	No			
Fecha ensayo	4 de abril de 2012			
Técnico laboratorio	Camilo Bernad			
Norma de referencia	UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.			
Ajuste probeta	Pulido en las dos caras			
Resultados				
Muestra	1-P2	1-P6	2-P11	2-P14
Fuerza máx. (kN)	227,32	224,79	238,26	225,78
Ø probeta (mm)	93,1	93,1	93,1	93,1
Esbeltez	2	2	2	2
$f_c$ probeta (MPa)	33,39	33,02	35,00	33,17
$f_c$ media (MPa)	33,64			
Coef. Variación	2,72 %			

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey.</b>		
Fecha: 17/04/2012	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 3/7

**Determinación de la resistencia a fisuración (ensayo Barcelona):**

Datos del ensayo				
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W			
Nº Fabricación	211778			
Control de ensayo	Carrera			
Escala	1/5 (600 kN) clase 1.			
Velocidad	0,5 mm/min			
Registro deformación	No			
Fecha ensayo	4 de abril de 2012			
Técnico laboratorio	Camilo Bernad			
Norma de referencia	UNE-EN 83515. Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.			
Ajuste probeta	Corte con sierra circular			
Resultados				
Muestra	1-P8a	1-P8b	2-P16a	2-P16b
Fuerza máx. (kN)	38,33	48,81	46,05	43,70
Ø probeta (mm)	93,1	93,1	93,1	93,1
Altura probeta (mm)	100,10	99,77	100,10	99,87
(C.V.)	(0,20%)	(0,68%)	(0,10%)	(0,40%)
Ø punzón (mm)	24,5	24,5	24,5	24,5
$f_{ct}$ probeta (MPa)	2,21	2,83	2,66	2,53
Planos de fractura	3	4	3	3
$f_{ct}$ media (MPa)	2,55			
Coef. Variación	10,16 %			



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey.</b>		
Fecha: 17/04/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 4/7

**Determinación del módulo de deformación longitudinal:**

Datos del ensayo				
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W			
Nº Fabricación	211778			
Control de ensayo	Fuerza			
Escala	1/5 (600 kN) clase 1.			
Rango del ciclo	2 – 75 kN			
Velocidad	2 kN/min			
Registro deformación	3 LVDT marca Solartron, modelo Rango $\pm 5$ mm, linealidad: 0,5 %.			
Fecha ensayo	13 de abril de 2012			
Técnico laboratorio	Camilo Bernad			
Norma de referencia	UNE-EN 83316. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.			
Ajuste probeta	Pulido en las dos caras			
Resultados				
Muestra	1-P4	1-P9	2-P13	2-P18
Fuerza máx. (kN)	38,33	48,81	46,05	43,70
$\varnothing$ probeta (mm)	93,1	93,1	93,1	93,1
Esbeltez	2	2	2	2
E ciclo (2º-3º)(MPa)	31.630	31.030	29.013	31.039
	31.506	31.361	29.092	31.050
E probeta (MPa)	31.600	31.200	29.100	31.000
E media (MPa)	30.700			
Coef. Variación	3,62 %			

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey.</b>		
Fecha: 17/04/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 5/7

**Determinación de la resistencia a tracción indirecta:**

Datos del ensayo				
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W			
Nº Fabricación	211778			
Control de ensayo	Fuerza			
Escala	1/5 (800 kN) clase 1.			
Velocidad	kN/min			
Registro deformación	No			
Fecha ensayo	17 de abril de 2012			
Técnico laboratorio	Camilo Bernad			
Norma de referencia	UNE-EN 12390-6. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.			
Ajuste probeta	Pulido en las dos caras			
Ensayos previos realizados	Determinación del módulo de elasticidad longitudinal			
Resultados				
Muestra	1-P4	1-P9	2-P13	2-P18
Fuerza máx. (kN)	88,39	104,86	103,97	98,20
Ø probeta (mm)	93,1	93,1	93,1	93,1
Altura probeta (mm)	197	99,77	100,10	99,87
$f_{ct}$ probeta (MPa)	3,07	3,64	3,61	3,41
$f_{ct}$ media (MPa)	3,43			
Coef. Variación	7,66 %			

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey.</b>		
Fecha: 17/04/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 6/7

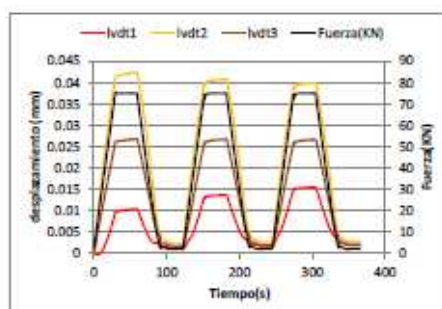


Figura 3. Registros de deformación en la determinación del módulo muestra 1-P4.

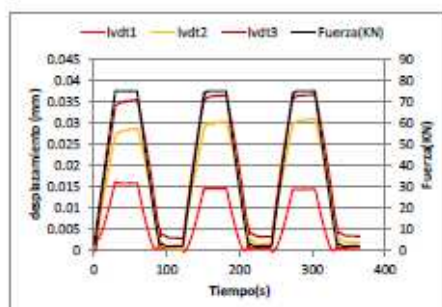


Figura 4. Registros de deformación en la determinación del módulo muestra 1-P9.

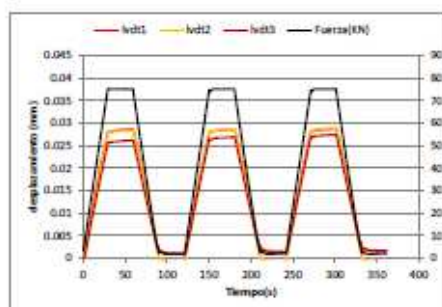


Figura 5. Registros de deformación en la determinación del módulo muestra 2-P13.

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey.</b>		
Fecha: 17/04/2012	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 7/7

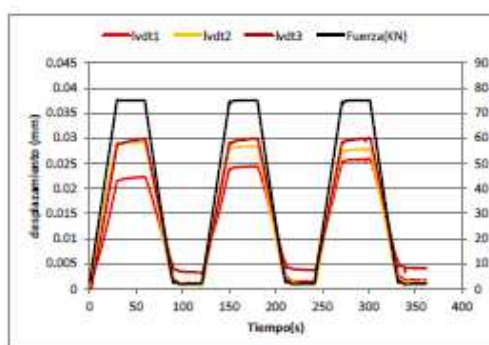


Figura 6. Registros de deformación en la determinación del módulo muestra 2-P18.

Barcelona, a 17 de abril de 2012

El Director del LTE

LABORATORI DE TECNOLOGIA D'ESTRUCTURES  
Centre d'Enginyeria de la Construcció  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



Tomàs Garcia  
Ing. Técnico de Obras Públicas

## A9.2.- PERFIL 51 1<sup>er</sup> y 2<sup>o</sup> ensayos

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/1012-39</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 2.</b>		
Fecha: 23/10/2012	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 1/8

### Descripción de las muestras de ensayo:



Peticionario	Antonio Aguado
Tipo de muestras	Extracción de testigos de dos fragmentos de New Jersey.
Material	Hormigón convencional (H) y hormigón con incorporación de caucho (HC)
Número de muestras	New Jersey de HC: 10, PI-1 a PI-10 (figura 1). New Jersey de H: 10, PII-1 a PII-10 (figura 2)
Muestras no válidas	
Día de extracción	Miércoles 3 de octubre de 2012.
Operarios	Camilo Bernad y Jorge Cabrerizo.
Lugar de extracción	Circuito de Idiada, L'Albomar (Tarragona).
Ø broca	100 mm exterior; 93,1 mm interior.
Longitud:	Variable



Figura 1. Ubicación extracciones en fragmento de New Jersey de HC.





Figura 2. Ubicación extracciones en fragmento de New Jersey de H.

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/1012-39</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 2.</b>		
Fecha: 23/10/2012	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 2/8



**Determinación de la resistencia a compresión:**

Datos del ensayo				
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W			
Nº Fabricación	211778			
Control de ensayo	Fuerza			
Escala	1/5 (600 kN) clase 1.			
Velocidad	3,9 kN/s			
Registro deformación	No			
Fecha ensayo	19 de octubre de 2012			
Técnico laboratorio	Camilo Bernad			
Norma de referencia	UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.			
Ajuste probeta	Corte con sierra circular y pulido en las dos caras.			
Resultados				
Muestra	PI-6	PI-10	PII-9	PII-10
Fuerza máx. (kN)	161,40	172,00	222,90	221,50
Ø probeta (mm)	93,10	93,05	93,15	93,10
Esbeltez	2	2	2	2
f <sub>c</sub> probeta (MPa)	23,71	25,29	32,71	32,55
f <sub>c</sub> media (MPa)	24,50		32,63	
Coef. Variación	4,57%		0,34%	

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/1012-39</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 2.</b>		
Fecha: 23/10/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 3/8

**Determinación de la resistencia a fisuración (ensayo Barcelona):**



Datos del ensayo				
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W			
Nº Fabricación	211778			
Control de ensayo	Carrera			
Escala	1/5 (600 kN) clase 1.			
Velocidad	0,5 mm/min			
Registro deformación	No			
Fecha ensayo	22 de octubre de 2012			
Técnico laboratorio	Camilo Bernad			
Norma de referencia	UNE-EN 83515. Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.			
Ajuste probeta	Corte con sierra circular y pulido en las dos caras.			
Resultados				
Muestra	PI-2	PI-5	PII-1	PII-6
Fuerza máx. (kN)	36,40	31,08	42,09	41,68
Ø probeta (mm)	93,25	93,15	93,10	93,10
Altura probeta (mm) (C.V.)	98,37 (0,50%)	96,57 (0,51%)	99,20 (0,44%)	99,73 (0,15%)
Ø punzón (mm)	24,5	24,5	24,5	24,5
$f_{ct}$ probeta (MPa)	2,14	1,86	2,45	2,41
Planos de fractura	3	4	3	3
$f_{ct}$ media (MPa)	2,00		2,43	
Coef. Variación	9,85%		1,07%	

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/1012-39</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 2.</b>		
Fecha: 23/10/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 4/8

**Determinación del módulo de deformación longitudinal:**



Datos del ensayo				
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W			
Nº Fabricación	211778			
Control de ensayo	Fuerza			
Escala	1/5 (800 kN) clase 1.			
Rango del ciclo	4 – 50 kN serie PI y 4 - 67 kN serie PII			
Velocidad	2,3 kN/s			
Registro deformación	3 LVDT marca Solartron, modelo Rango $\pm$ 5 mm, linealidad: 0,5 %.			
Fecha ensayo	19 y 22 de octubre de 2012			
Técnico laboratorio	Camilo Bernad			
Norma de referencia	UNE-EN 83316. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.			
Ajuste probeta	Corte con sierra circular y pulido en las dos caras.			
Resultados				
Muestra	PI-4	PI-9	PII-3	PII-8
Fecha	22/10/2012	19/10/2012	22/10/2012	22/10/2012
Fuerza máx. ciclo (kN)	50,00	50,00	67,00	67,00
Ø probeta (mm)	93,1	93,1	93,1	93,1
Esbeltez	2	2	2	2
E ciclo (2º-3º)(MPa)	24.556	23.560	28.128	27.795
	24.516	23.689	28.143	27.959
E probeta (MPa)	24.500	23.600	28.100	27.900
E media (MPa)	24.100		28.000	
Coef. Variación	2,64%		0,51%	



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/1012-39</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 2.</b>		
Fecha: 23/10/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 5/8

**Determinación de la resistencia a tracción indirecta:**

Datos del ensayo				
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W			
Nº Fabricación	211778			
Control de ensayo	Fuerza			
Escala	1/5 (600 kN) clase 1.			
Velocidad	1,4 kN/s			
Registro deformación	No			
Fecha ensayo	23 de octubre de 2012			
Técnico laboratorio	Camilo Bernad			
Norma de referencia	UNE-EN 12390-6. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.			
Ajuste probeta	Corte con sierra circular y pulido en las dos caras.			
Ensayos previos realizados	Determinación del módulo de elasticidad longitudinal			
Resultados				
Muestra	PI-4	PI-9	PII-3	PII-8
Fuerza máx. (kN)	78,21	68,81	80,48	82,96
Ø probeta (mm)	93,1	93,1	93,1	93,1
Altura probeta (mm)	196,13	195,73	196,00	194,10
$f_{ct}$ probeta (MPa)	2,73	2,40	2,81	2,92
$f_{ct}$ media (MPa)	2,57		2,87	
Coef. Variación	8,90%		2,83%	

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/1012-39</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 2.</b>		
Fecha: 23/10/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 6/8

**Determinación:**

Datos del ensayo				
Norma de referencia	UNE-EN 12390-7. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido.			
Lugar de ensayo	Laboratori de Materials de Construcció			
Técnico laboratorio	Robert M. Mc-Aloon			
Fecha ensayo	Del 17 al 23 de octubre de 2012			
Condiciones secado	60-85 °C, 4 ½ días			
Ajuste probeta	Corte con sierra circular.			
Resultados				
Muestra	PI-3	PI-7	PII-2	PII-7
Ø probeta <sup>(1)</sup> (mm)	93,10 (0,0%)	93,05 (0,8%)	93,15 (0,8%)	93,10 (0,0%)
Altura probeta <sup>(2)</sup> (mm)	196,03 (0,06%)	194,90 (0,52%)	196,07 (0,46%)	196,00 (0,27%)
Masa cond .recepción (kg)	3,0185	2,9350	3,0945	3,0450
Masa muestra sat. (kg)	3,0496	2,9671	3,1209	3,0749
Masa muestra seca (kg)	2,9371	2,8427	3,0185	2,9631
Masa muestra sumergida (kg)	1,6904	1,6159	1,7605	1,7159
Vol. método de ref. (m <sup>3</sup> )	0,0013619	0,0013539	0,0013631	0,0013617
Densidad condiciones de recepción (kg/m <sup>3</sup> )	2,216	2,168	2,270	2,236
	2,190 (1,56%)		2,250 (1,07%)	
Densidad muestra saturada (kg/m <sup>3</sup> )	2,239	2,191	2,289	2,258
	2220 (1,52%)		2,270 (0,98%)	
Densidad muestra seca (kg/m <sup>3</sup> )	2,156	2,099	2,214	2,175
	2,130 (1,89%)		2,200 (1,23%)	

<sup>(1)</sup> Valor medio de dos determinaciones<sup>(2)</sup> Valor medio de tres determinaciones

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/1012-39</b> <b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 2.</b>		
	Fecha: 23/10/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	
			Página: 7/8

Registros desplazamiento y fuerza para determinación del módulo de elasticidad longitudinal:

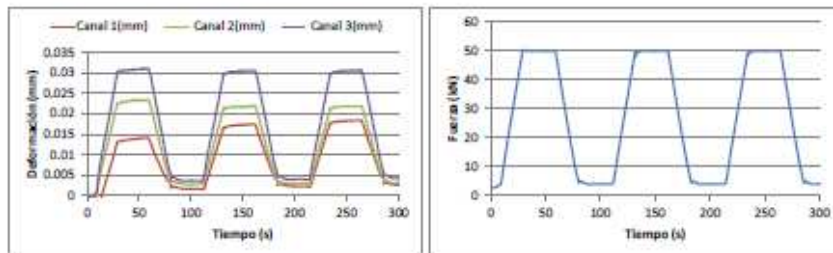


Figura 3. Registros de deformación en la determinación del módulo muestra PI-4.

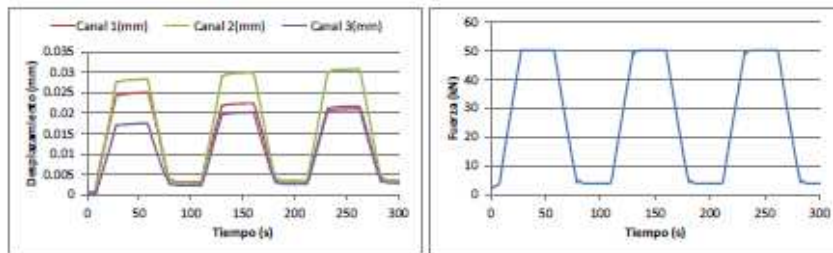


Figura 4. Registros de deformación en la determinación del módulo muestra PI-9.

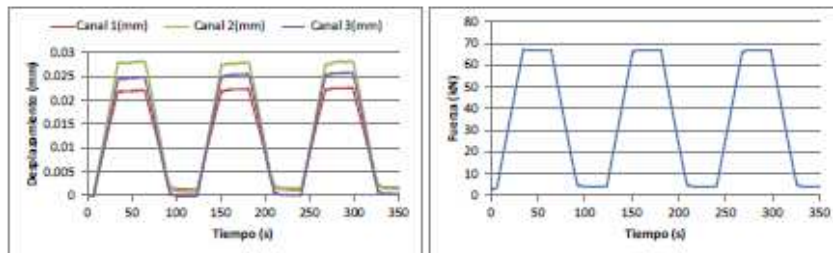


Figura 5. Registros de deformación en la determinación del módulo muestra PII-3.

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/1012-39</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 2.</b>		
Fecha: 23/10/2012	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 8/8

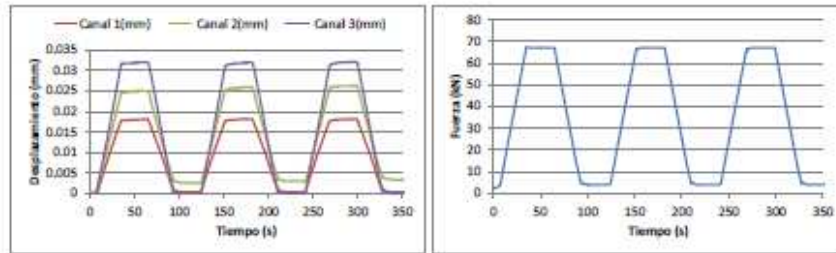


Figura 6. Registros de deformación en la determinación del módulo muestra PII-8.



Barcelona, a 23 de octubre de 2012

El Director del LTE



Tomàs Garcia  
Ing. Técnico de Obras Públicas

## A9.3.- PERFIL 73



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0513-15</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 3.</b>		
Fecha: 14/5/2013	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 1/7

**Descripción de las muestras de ensayo:**

Peticionario	Antonio Aguado
Tipo de muestras	Extracción de testigos de un fragmento de New Jersey en dos zonas, una de ellas diferenciada por la aplicación superficial de una capa de óxido de titanio (TiO <sub>2</sub> )
Material	Hormigón convencional (H)
Número de muestras	Sin TiO <sub>2</sub> : STI2, STI3, STI4, STI5 Con TiO <sub>2</sub> : CTI1, CTI6, CTI7, CTI8
Incidencias	STI3 fraccionado en dos mitades
Muestras no válidas	
Día de extracción	Jueves 18 de abril de 2013.
Operarios	Camilo Bernad y Robert M. Mc-Aloon.
Lugar de extracción	Circuito de Idiada, L'Albomar (Tarragona).
Ø broca	100 mm exterior; 93,1 mm interior.
Longitud:	Variable



(no disponible)

*Figura 1. Ubicación extracciones en fragmento de New Jersey.*

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0513-15</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 3.</b>		
Fecha: 14/5/2013	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 2/7



**Determinación de la resistencia a compresión:**

Datos del ensayo		
Referencia norma	UNE-EN 12390-3	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W	
Nº Fabricación	211778	
Control de ensayo	Fuerza	
Escala	1/1 (3000 kN) clase 1.	
Velocidad	3,8 kN/s	
Registro deformación	No	
Fecha ensayo	19 de abril de 2013	
Técnico laboratorio	Camilo Bernad	
Norma de referencia	UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.	
Ajuste probeta	Corte con sierra circular y pulido en las dos caras.	
Resultados		
Muestra	STi4	CTi6
Fuerza máx. (kN)	310,50	306,40
Ø probeta (mm)	93,00	93,00
Esbeltez	2	2
$f_c$ probeta (MPa)	45,71	45,11
$f_c$ media (MPa)	45,41	
Coef. Variación	0,94%	

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0513-15</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 3.</b>		
Fecha: 14/5/2013	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 3/7

**Determinación de la resistencia a fisuración (ensayo Barcelona):**



Datos del ensayo		
Referencia norma	UNE 83515	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W	
Nº Fabricación	211778	
Control de ensayo	Carrera	
Escala	1/5 (600 kN) clase 1.	
Velocidad	0,5 mm/min	
Registro deformación	No	
Fecha ensayo	22 de abril de 2013	
Técnico laboratorio	Camilo Bernad	
Norma de referencia	UNE-EN 83515. Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.	
Ajuste probeta	Corte con sierra circular	
Resultados		
Muestra	STi2a	STi2b
Fuerza máx. (kN)	50,75	57,28
Ø probeta (mm)	93,00	93,00
Altura probeta (mm) (C.V.)	100,97 (1,01%)	97,63 (0,87%)
Ø punzón (mm)	24,5	24,5
$f_{ct}$ probeta (MPa)	2,90	3,39
Planos de fractura	2	3
$f_{ct}$ media (MPa)	3,15	
Coef. Variación	10,91%	

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0513-15</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 3.</b>		
Fecha: 14/5/2013	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 4/7

**Determinación del módulo de deformación longitudinal:**

Datos del ensayo		
Referencia norma	UNE 83316	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W	
Nº Fabricación	211778	
Control de ensayo	Fuerza	
Escala	1/5 (800 kN) clase 1.	
Rango del ciclo	3,3 – 100 kN	
Registro deformación	3 LVDT marca Solartron, modelo Rango $\pm 5$ mm, linealidad: 0,5 %.	
Fecha ensayo	19 y 22 de octubre de 2012	
Técnico laboratorio	Camilo Bernad	
Norma de referencia	UNE-EN 83316. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.	
Ajuste probeta	Corte con sierra circular y pulida en las dos caras.	
Resultados		
Muestra	STi5	CTi7
Fecha	22/04/2013	22/04/2013
Fuerza máx. ciclo (kN)	100,0	100,0
Ø probeta (mm)	93,0	93,0
Esbeltez	2	2
E ciclo (2º-3º)(MPa)	34.248	32.219
	34.280	31.966
E probeta (MPa)	34.300	32.000
E media (MPa)	33.200	
Coef. Variación	4,90%	



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0513-15</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 3.</b>		
Fecha: 14/5/2013	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 5/7

**Determinación de la resistencia a tracción indirecta:**

Datos del ensayo		
Referencia norma	UNE-EN 12390-6	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W	
Nº Fabricación	211778	
Control de ensayo	Fuerza	
Escala	1/5 (600 kN) clase 1.	
Velocidad	1,4 kN/s	
Ensayos previos	Módulo de deformación	
Fecha ensayo	25 de abril de 2013	
Técnico laboratorio	Camilo Bernad	
Norma de referencia	UNE-EN 12390-6. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.	
Ajuste probeta	Corte con sierra circular y pulida en las dos caras.	
Ensayos previos realizados	Determinación del módulo de elasticidad longitudinal	
Resultados		
Muestra	STi5	CTi7
Fuerza máx. (kN)	115,90	101,93
Ø probeta (mm)	93,0	93,0
Altura probeta (mm)	198,20	197,70
$f_{ct}$ probeta (MPa)	4,00	3,53
$f_{ct}$ media (MPa)	3,77	
Coef. Variación	8,89%	

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0513-15</b> <b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 3.</b>		
	Fecha: 14/5/2013	Revisada por: Tomás García	
			Página: 6/7

**Determinación:**

Datos del ensayo				
Norma de referencia	UNE-EN 12390-7. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido.			
Lugar de ensayo	Laboratori de Materials de Construcció			
Técnico laboratorio	Robert M. Mc-Aloon			
Fecha ensayo	Del 2 al 14 de mayo de 2013			
Condiciones secado:	60-65 °C, del 3 al 14 de mayo			
Muestras	Resto de testigos CTi8 y CTi7, y fragmentos testigo STi3.			
Ajuste muestras	No.			
Resultados				
Muestra	STi3a	STi3b	CTi8	CTi7
Ø probeta (mm)	93,00 (0,0%)	93,00 (0,8%)	93,15 (0,8%)	93,10 (0,0%)
Altura probeta <sup>(1)</sup> (mm)	145-132	136-122	60-40	45-36
Masa cond .recepción (kg)	2,2146	2,0080	0,7923	0,5992
Masa muestra sat. (kg)	2,2468	2,0392	0,8095	0,6141
Masa muestra seca (kg)	2,1472	1,9402	0,7715	0,5832
Masa muestra sumergida (kg)	1,3022	1,1771	0,4717	0,3554
Vol. método de ref. (m <sup>3</sup> )	0,0009465	0,0008638	0,0003385	0,0002592
Densidad condiciones de recepción (kg/m <sup>3</sup> )	2.340	2.325	2.341	2.312
	2.329 (0,60%)			
Densidad muestra saturada (kg/m <sup>3</sup> )	2.374	2.361	2.392	2.369
	2.374 (0,55%)			
Densidad muestra seca (kg/m <sup>3</sup> )	2.269	2.246	2.279	2.250
	2.261 (0,70%)			

<sup>(1)</sup> Valor máximo y mínimo

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0513-15</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 3.</b>		
Fecha: 14/5/2013	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 7/7

Registros desplazamiento y fuerza para determinación del módulo de elasticidad longitudinal:

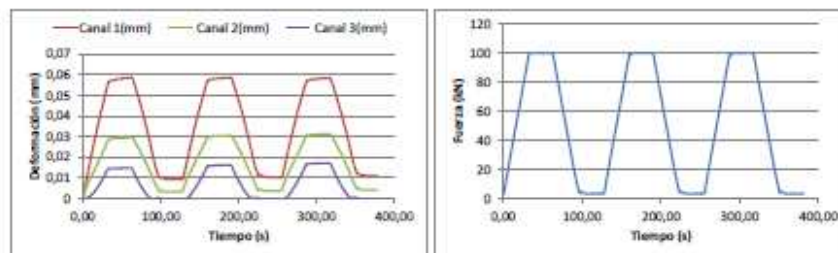


Figura 2. Registros de deformación en la determinación del módulo, muestra ST15.

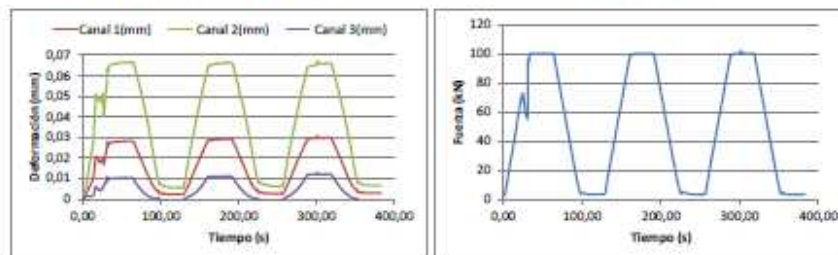


Figura 3. Registros de deformación en la determinación del módulo, CT17.


Barcelona, a 14 de mayo de 2013

El Director del LTE

  
 LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE ESTRUCTURAS  
 Dep. Ingeniería de la Construcción  
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Tomàs Garcia  
Ing. Técnico de Obras Públicas

## A9.4.- PERFIL 122



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0614-60</b>		 UPC
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 4</b>		
Fecha: 30/6/2014	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 1/10

## Descripción de las muestras de ensayo:

Peticionario	Antonio Aguado
Tipo de muestras	Extracción de testigos de un fragmento de New Jersey en dos zonas, A y B.
Material	Hormigón convencional reforzado con fibras
Ø broca	100 mm exterior; 92,3 mm interior (aproximadamente). 160 mm exterior; 153 mm interior (aproximadamente)
Número de muestras	Zona A: 7 Ø92,3 mm y 2 Ø153 mm Zona B: 9 Ø92,3 mm y 2 Ø153 mm
Incidencias	
Muestras no válidas	
Día de extracción	Martes 29 de abril de 2013.
Operarios	Camilo Bernad y Robert M. Mc-Aloon.
Lugar de extracción	Circuito de Idiada, L'Albomar (Tarragona).
Longitud:	Variable



Figura 1. Ubicación extracciones A (sup.) y B (inf., tomada previamente a las dos últimas extracciones) en fragmento de New Jersey.

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0614-60</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 4</b>		
Fecha: 30/6/2014	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 2/10



**Determinación de la densidad del hormigón en condiciones de recepción.**

Datos del ensayo					
Norma de referencia	UNE-EN 12390-7. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido.				
Lugar de ensayo	Laboratori de Materials de Construcció				
Técnico laboratorio	Camilo Bernad				
Fecha ensayo	Junio de 2014				
Determinación del volumen	Geoméricamente				
Resultados					
Muestra	Ø probeta <sup>(1)</sup> (mm)	Altura probeta <sup>(2)</sup> (mm)	Masa cond . recepción (kg)	Vol. (m <sup>3</sup> )	Densidad cond. Recep. (kg/m <sup>3</sup> ).
A1	92,3	200,2	3.149	0,0013393	2.351
A2	92,3	206,1	3.229	0,0013790	2.342
A3	92,3	126,5	1.976	0,0008466	2.334
A4	92,3	182,4	2.838	0,0012207	2.325
A5	92,3	225,2	3.209	0,0015068	2.130 <sup>(*)</sup>
A6	92,3	150,6	2.356	0,0010074	2.339
A7	92,3	176,7	2.772	0,0011823	2.345
A					2.340 (0,4%)
B1	92,3	199,0	3,047	0,0013315	2.288
B2	92,3	193,9	3,018	0,0012972	2.327 <sup>(*)</sup>
B3	92,3	199,9	3,107	0,0013373	2.323
B4	92,3	199,4	3,089	0,0013342	2.315
B5	92,3	199,7	3,093	0,0013362	2.315
B6	92,3	204,3	3,165	0,0013672	2.315
B7	92,3	198,5	3,071	0,0013279	2.313
B8	92,3	198,8	3,131	0,0013304	2.353
B9	92,3	184,2	2,851	0,0012327	2.313
B					2.320 (0,6%)

<sup>(1)</sup> Valor nominal medido en los testigos



<sup>(2)</sup> Valor medio de 3 determinaciones

<sup>(\*)</sup> Valor no considerado en el cálculo de la media

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0614-60</b> <b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 4</b>		 UPC
	Fecha: 30/6/2014	Revisada por: Tomás García	
			Página: 3/10



**Determinación de la resistencia a compresión:**

Datos del ensayo						
Referencia norma	UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.					
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W					
Nº Fabricación	211778					
Control de ensayo	Fuerza					
Escala	1/1 (3000 kN) clase 1.					
Velocidad	3,34 kN/s					
Registro deformación	No					
Fecha ensayo	18 de junio de 2014					
Técnico laboratorio	Camilo Bernad					
Ajuste probeta	Corte con sierra circular y pulido en las dos caras.					
Resultados						
Muestra	A1	A2	A5	B1	B3	B4
Fuerza máx. (kN)	239,21	211,64	212,12	185,01	193,12	195,76
Ø probeta (mm)	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3
Esbeltez	2	2	2	2	2	2
$f_c$ probeta (MPa)	35,75	31,63	31,70	27,65	28,86	29,25
$f_c$ media (MPa)	33,0			28,6		
Coef. Variación	7,1%			2,9%		

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0614-60</b> <b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 4</b>		 UPC
	Fecha: 30/6/2014	Revisada por: Tomàs Garcia	
			Página: 4/10

**Determinación del módulo de deformación longitudinal:**



Datos del ensayo						
Referencia norma	UNE 83318. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.					
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W					
Nº Fabricación	211778					
Control de ensayo	Fuerza					
Escala	1/1 (3000 kN) clase 1.					
Rango del ciclo	3,3 – 73,6 kN hormigón zona A 3,3 – 64,6 kN hormigón zona B					
Registro deformación	3 LVDT marca Solartron, modelo Rango $\pm 5$ mm, linealidad: 0,5 %.					
Técnico laboratorio	Camilo Bernad					
Ajuste probeta	Corte con sierra circular y pulida en las dos caras.					
Resultados						
Muestra	A4	A6	A7	B5	B6	B7
Fecha	25/6/14	26/6/14	25/6/14	25/6/14	25/6/14	25/6/14
Fuerza máx. ciclo (kN)	76,6	76,6	76,6	64,6	64,6	64,6
$\varnothing$ probeta (mm)	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3
Esbeltez	1,98	1,63	1,91	2,16	2,21	2,15
E ciclo (2º-3º)(MPa)	22.665 22.795	28.396 28.458	27.334 27.492	26.279 26.236	22.107 22.135	24.125 24.085
E probeta (MPa)	22.700	28.400	27.400	26.300	22.100	24.100
E media (MPa)	26.200			24.200		
Coef. Variación	11,6%			8,7%		
$f_c$ probeta (MPa)	28,71	***	32,57	29,99	29,21	26,95
$f_{ct}$ probeta (MPa)	***		***	***	***	***

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0614-60</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 4</b>		
Fecha: 30/6/2014	Revisada por: Tomàs Garcia	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 5/10

**Determinación de la resistencia a fisuración (ensayo Barcelona):**

Datos del ensayo				
Referencia norma	UNE 83515. Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.			
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W			
Nº Fabricación	211778			
Control de ensayo	Carrera			
Escala	1/1 (3000 kN) clase 1.			
Velocidad	0,5 mm/min			
Registro deformación	No			
Fecha ensayo	26 de junio de 2014			
Técnico laboratorio	Camilo Bernad			
Ajuste probeta	Corte con sierra circular			
Resultados				
Muestra	A-BCN1	A-BCN2	B-BCN1	B-BCN2
Fuerza máx. (kN)	108.7	112.5	102.9	86.1
Ø probeta (mm)	153,0	153,0	153,0	153,0
Altura probeta (mm) (C.V.)	150,1 (0,7%)	149,9 (0,3%)	151,8 (2,3%)	152,3 (0,5%)
Ø punzón (mm)	37.5	37.5	37.5	37.5
$f_{ct}$ probeta (MPa)	2,73	2,83	2,56	2,13
Planos de fractura	3	2	4	3
$f_{ct}$ media (MPa)	2,78		2,35	
Coef. Variación	2,56%		12,8%	



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0614-60</b> <b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 4</b>		 UPC
	Fecha: 30/6/2014	Revisada por: Tomàs Garcia	
			Página: 6/10

**Determinación de la resistencia a tracción indirecta:**

Datos del ensayo					
Referencia norma	UNE-EN 12390-6. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.				
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000 W				
Nº Fabricación	211778				
Control de ensayo	Fuerza				
Escala	1/5 (800 kN) clase 1.				
Velocidad	1,4 kN/s				
Ensayos previos	Módulo de deformación				
Fecha ensayo	25 de abril de 2013				
Técnico laboratorio	Camilo Bernad				
Ajuste probeta	Corte con sierra circular y pulida en las dos caras.				
Resultados					
Muestra	A3	A6 <sup>(1)</sup>	B2	B8	B9
Fuerza máx. (kN)	66,20	66,12	109,67	113,73	84,8
Ø probeta (mm)	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3
Altura probeta (mm)	126,5	150,6	193,9	198,8	184,2
$f_{ct}$ probeta (MPa)	3,61	3,03	3,90	3,95	3,16
$f_{ct}$ media (MPa)	3,32		3,67		
Coef. Variación	12,3%		12,0%		

<sup>(1)</sup> Probeta sometida previamente a ensayo para la determinación del módulo de deformación longitudinal.

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0614-60 <b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 4</b>		 UPC
	Fecha: 30/6/2014	Revisada por: Tomás García	

Registros desplazamiento y fuerza para determinación del módulo de elasticidad longitudinal:

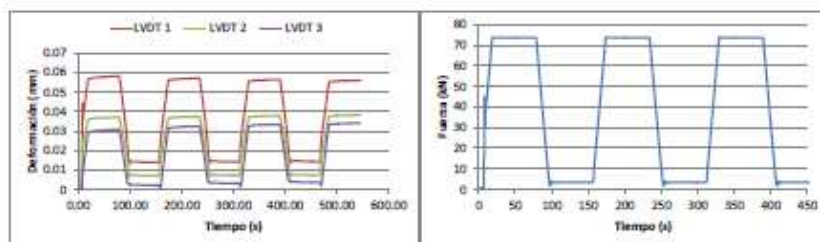


Figura 2. Registros de deformación en la determinación del módulo, muestra A4.

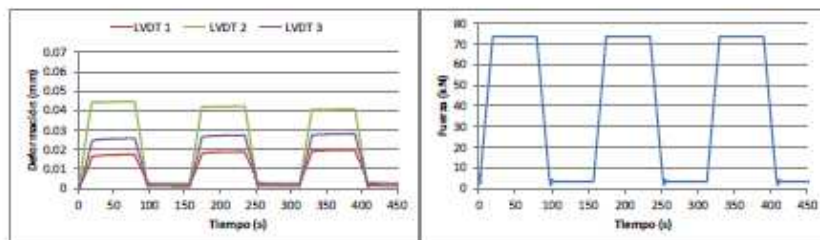


Figura 3. Registros de deformación en la determinación del módulo, A6.

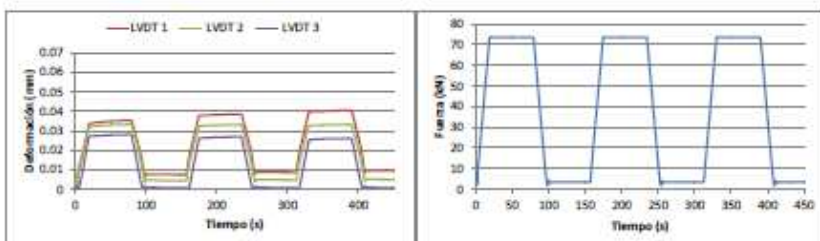


Figura 4. Registros de deformación en la determinación del módulo, A7.

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0614-60</b> <b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 4</b>		 UPC
	Fecha: 30/6/2014	Revisada por: Tomás García	

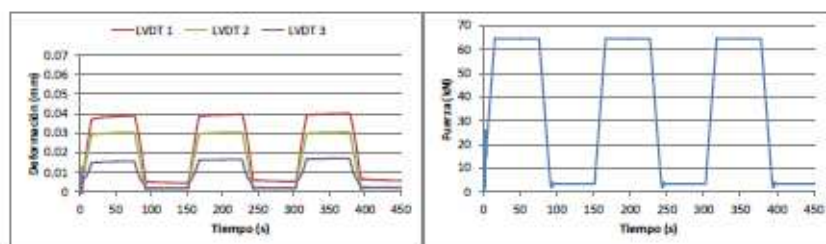


Figura 5. Registros de deformación en la determinación del módulo, B5.

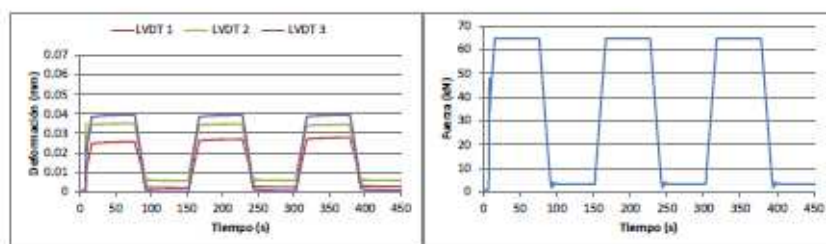


Figura 6. Registros de deformación en la determinación del módulo, B6.

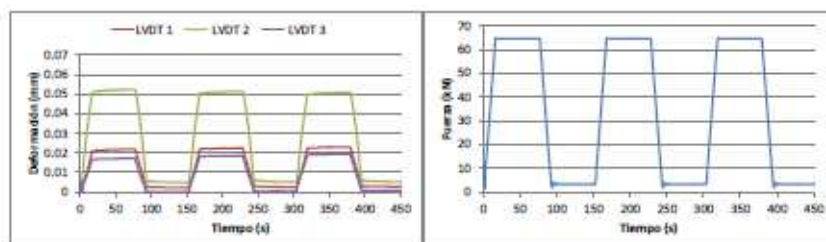
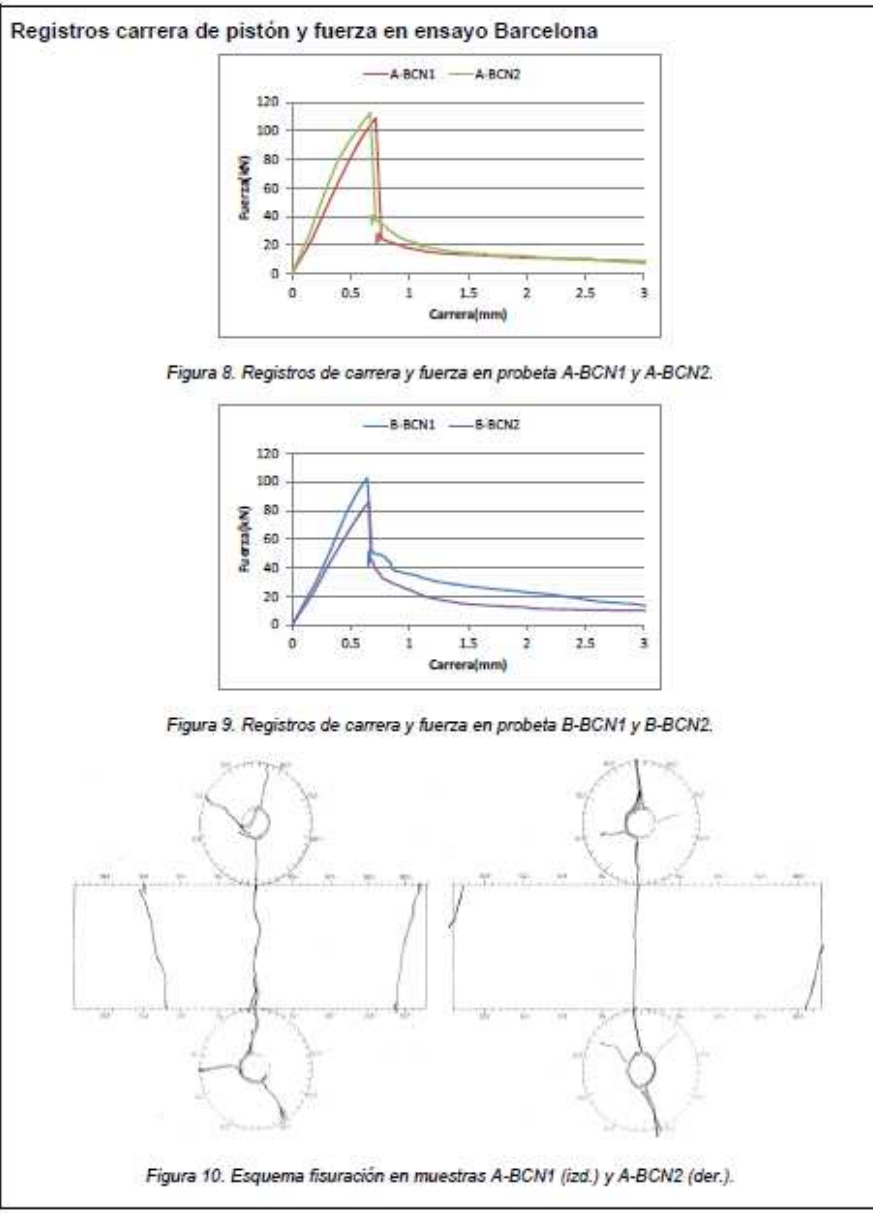


Figura 7. Registros de deformación en la determinación del módulo, B7.

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0614-60</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 4</b>		
Fecha: 30/6/2014	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 9/10



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures Luis Agulló	<b>FICHA DE ENSAYO LTE/TGV/0614-60</b>		
	<b>Caracterización del hormigón utilizado en la fabricación de New Jersey, 4</b>		
Fecha: 30/6/2014	Revisada por: Tomás García	Peticionario: Antonio Aguado	Página: 10/10

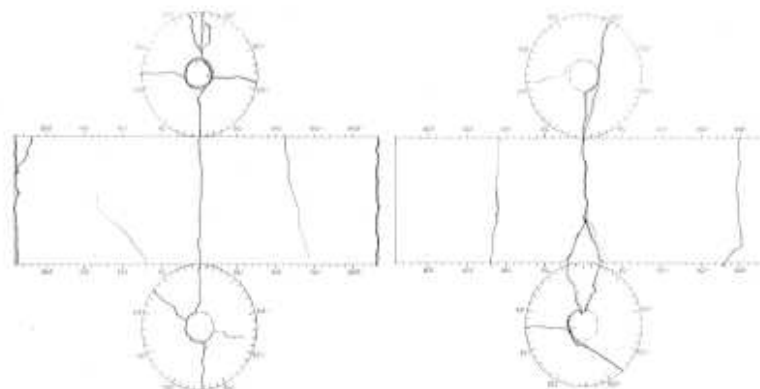


Figura 11. Esquema fisuración en muestras B-BCN1 (izd.) y B-BCN2 (der.)

Barcelona, a 30 de junio de 2014

El Director del LTE

  
**LABORATORIO DE TECNOLOGIA DE ESTRUCTURAS**  
 Dep. Ingeniería de la Construcción  
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Tomás García  
 Ing. Técnico de Obras Públicas

## ANEJO 10

# Ensayos de impacto



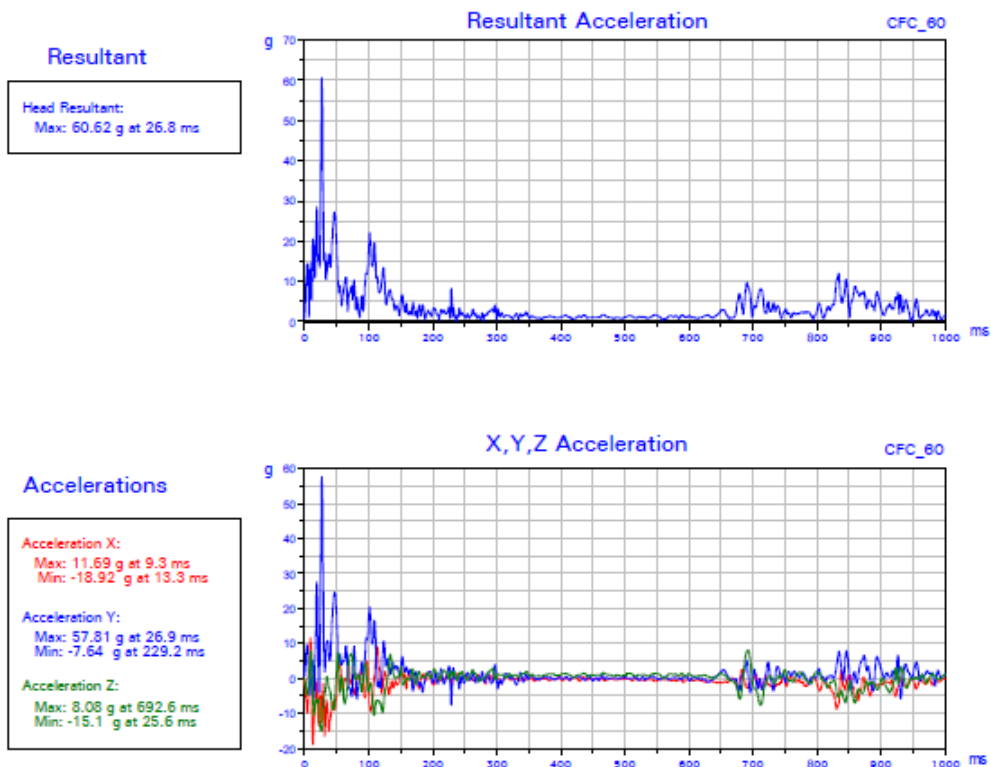
### A10.1.- PERFIL INICIAL (R2)

Test Number :120818AI /  
 SISTEMAS CONTENCIÓN DE VEHÍCULOS BARRERA HORMIGÓN 110 km/h  
 Vehicle Type: Supermini / VSX000098G4149990  
 Assessed System: Barrera de Hormigon  
 Date:2012-02-24

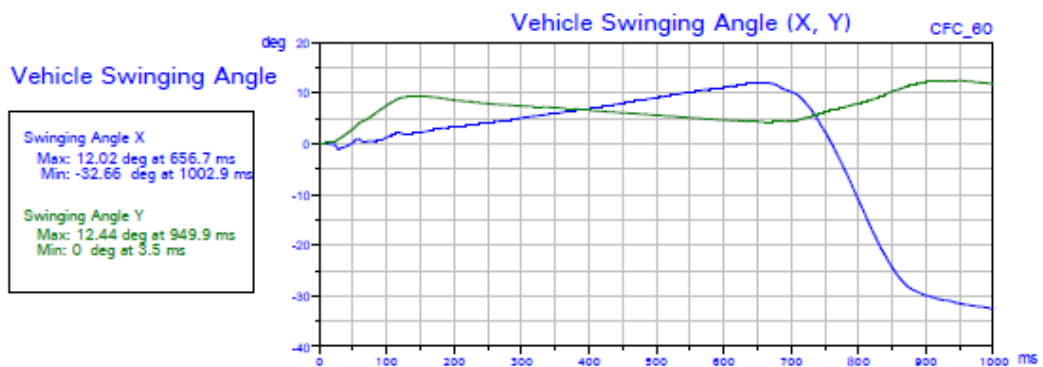
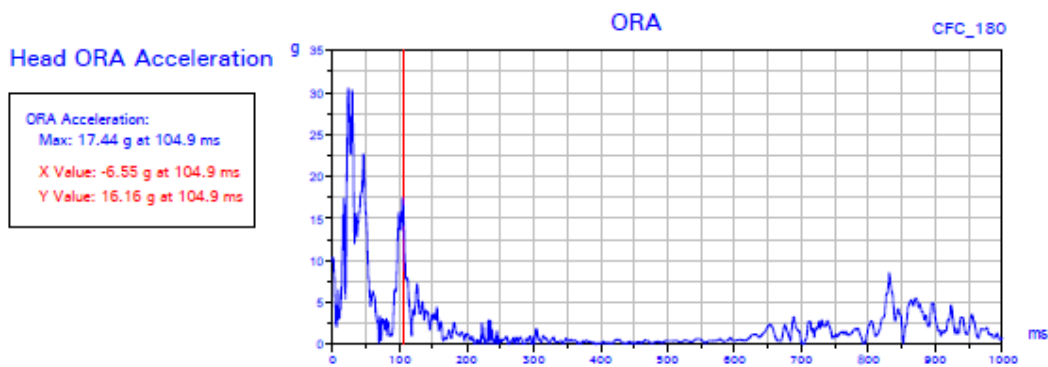
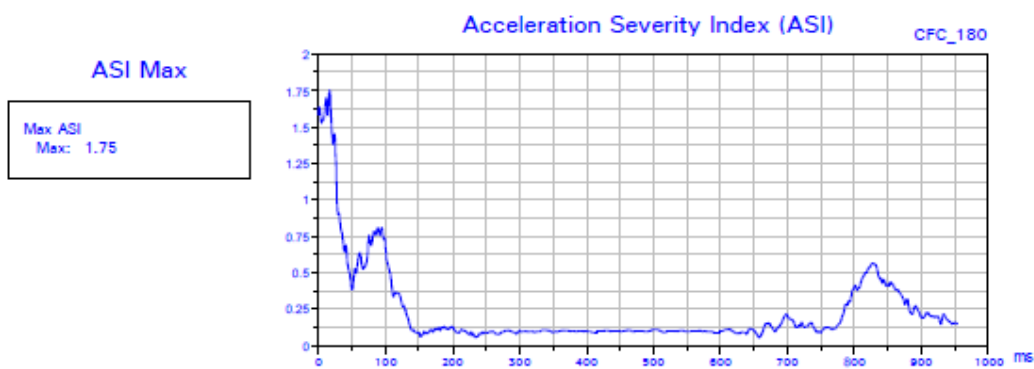
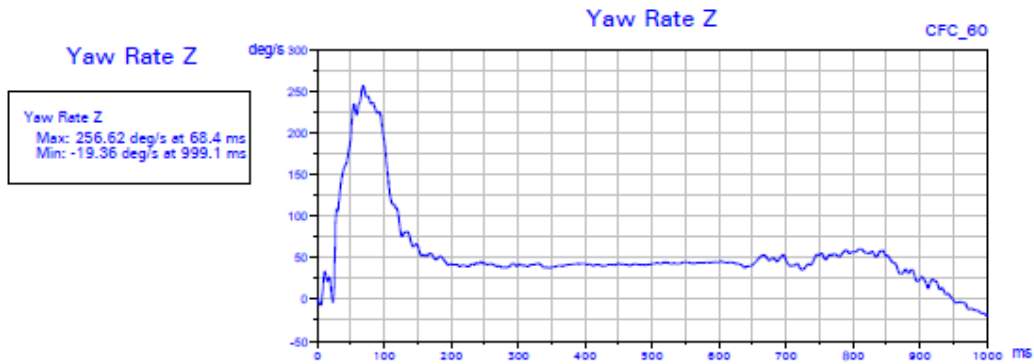


#### EN-1317:1998 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Results		Uncertainty
ASI	Acceleration Severity Index	1.75		0.000 %
X	Theoretical Head X Flight Distance	0.12 m		
Y	Theoretical Head Y Flight Distance	-0.30 m		
T	Theoretical Head Flight Time	74.20 ms		
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	28.14 Km/h		0.023 %
PHD	Post-Impact Head Deceleration	17.40 g	0.100 s	1.475 %
OIVx	X Occupant Impact Velocity	3.56 m/s	0.077 s	
OIVy	Y Occupant Impact Velocity	-7.07 m/s	0.077 s	
ORAx	X Occupant Ridedown Acceleration	-6.55 g	0.105 s	
ORAy	Y Occupant Ridedown Acceleration	16.16 g	0.105 s	







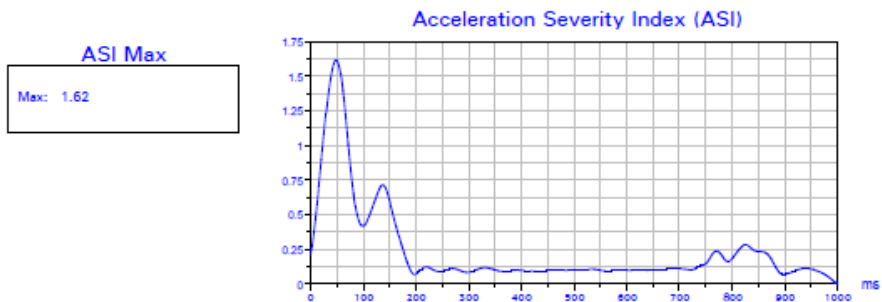
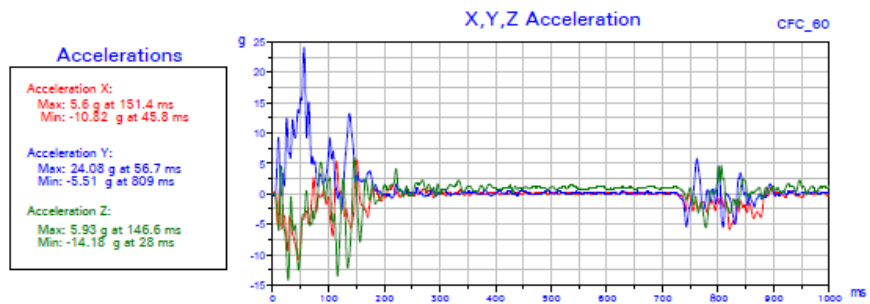
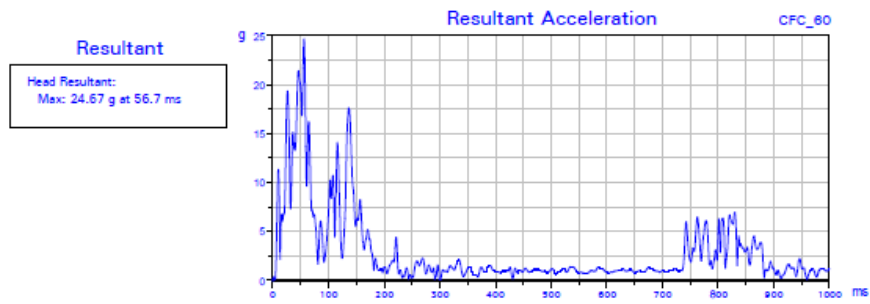
## A10.2.- PERFIL 51 1<sup>er</sup> ensayo

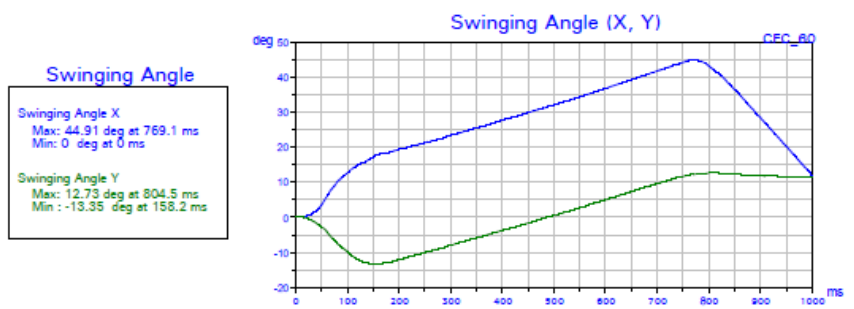
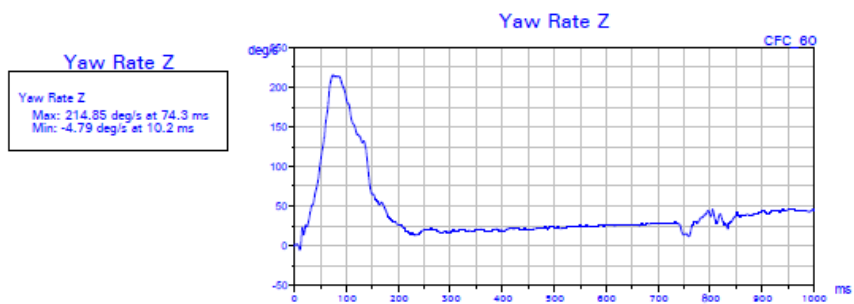
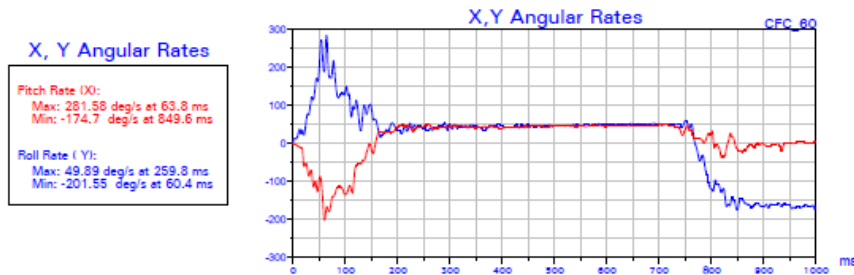
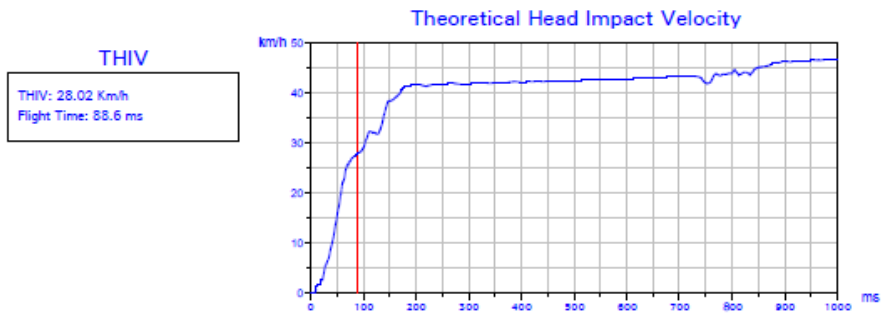
Test Number :123618A1 /  
 SISTEMAS CONTENCIÓN DE VEHÍCULOS BARRERA HORMIGÓN 100 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (Supermini) / VSX000093H4195538  
 Assessed System: Barrera de Hormigon  
 Date:2012-09-06



### EN-1317:2010 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.6	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	28 Km/h	THIV	0.027 %
T	Theoretical Head Flight Time	88.600 ms		





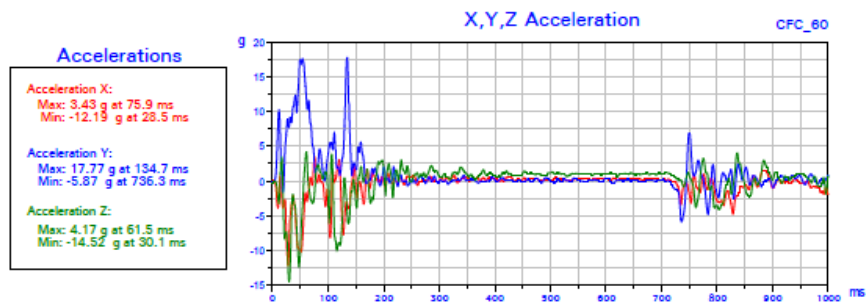
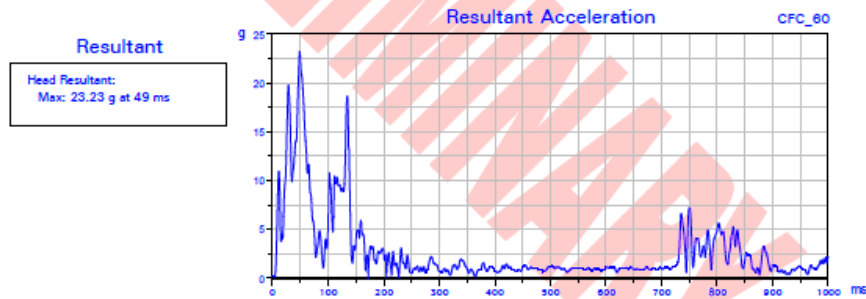
### A10.3.- PERFIL 51 2º ensayo

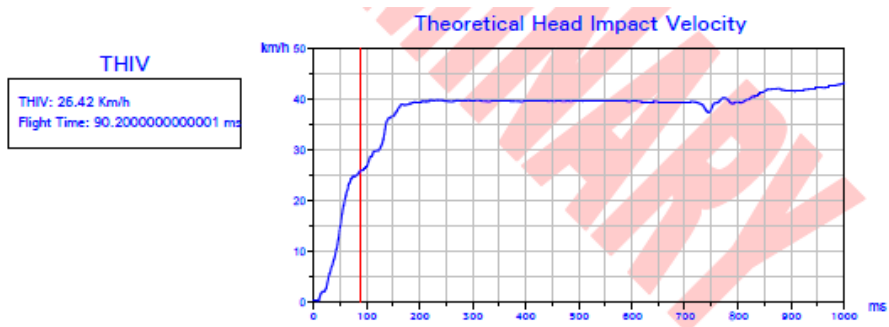
Test Number :123915AI /  
 TB 11 Barrera Hormigón 100 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (Supermini) / VSX000093K4303228  
 Assessed System: Barrera de Hormigón  
 Date:2012-09-27



#### EN-1317:2010 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.5	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	26 Km/h	THIV	0.026 %
T	Theoretical Head Flight Time	90.200 ms		





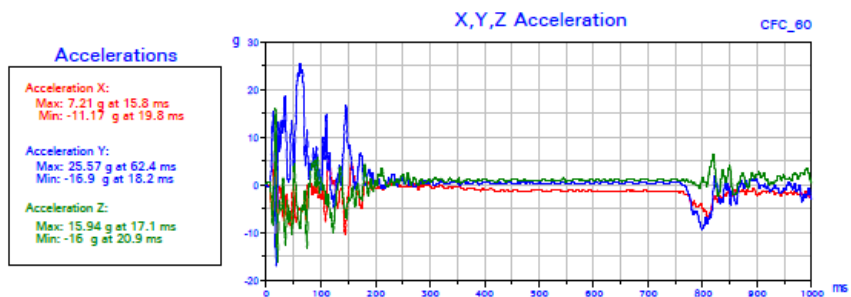
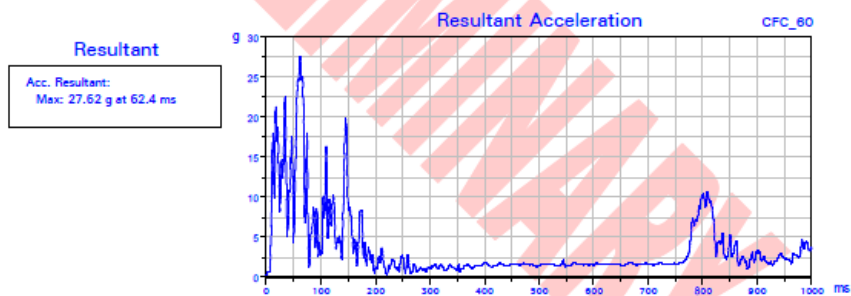
### A10.4.- PERFIL 73

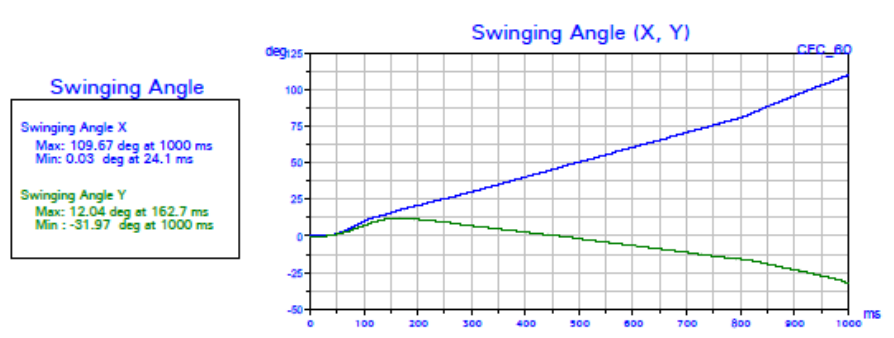
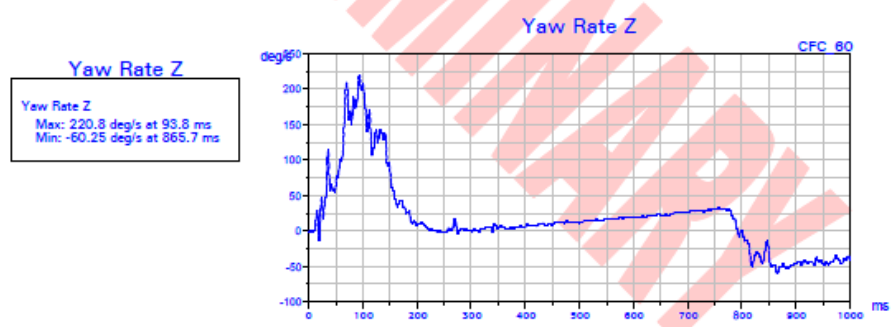
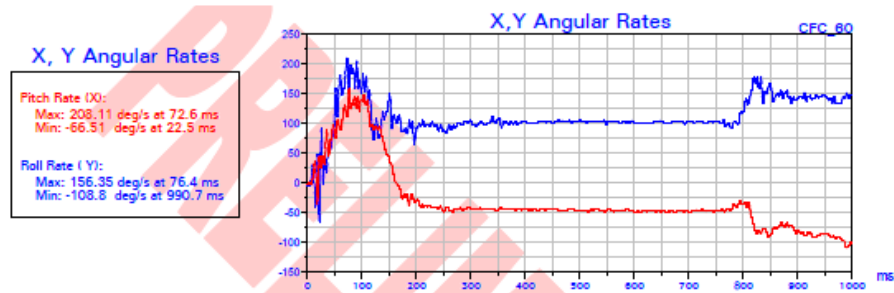
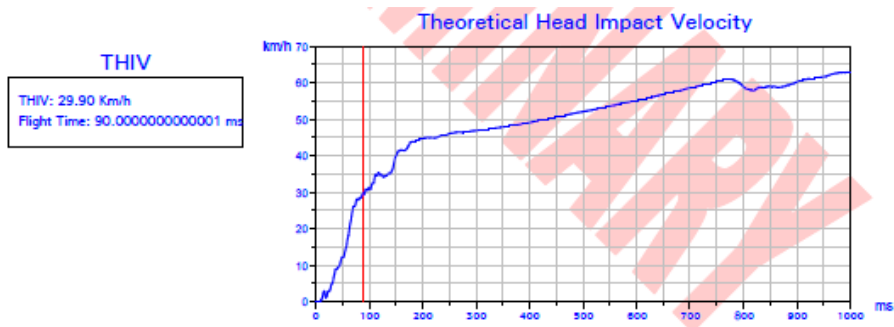
Test Number :130714AI /  
 SISTEMAS DE CONTENCIÓN DE VEHÍCULOS 100 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (supermini / M1) / VSX000094E4009876  
 Assessed System: Barrera de Hormigón  
 Date:2013-02-14



#### EN-1317:2010 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.6	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	30 Km/h	THIV	0.022 %
T	Theoretical Head Flight Time	90.000 ms		





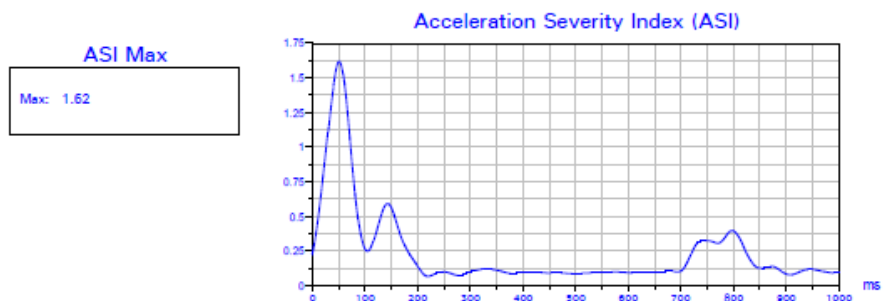
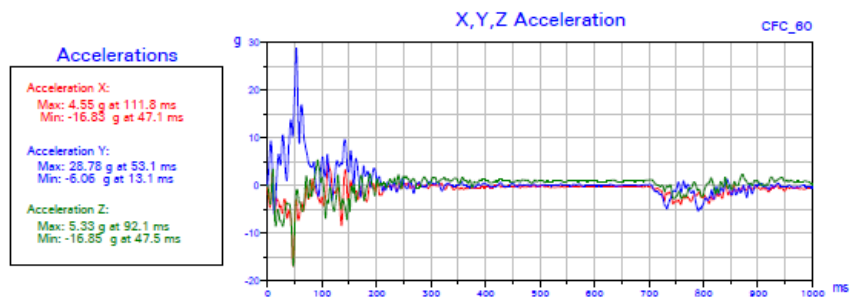
## A10.5.- PERFIL 119

Test Number :133601A1  
 Coche 900 kg a 100 km/h contra barrera de hormigón 100.8 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (supermini / M1) / VSX000099H4218916  
 Assessed System: Barrera de Hormigón  
 Date:2013-09-02

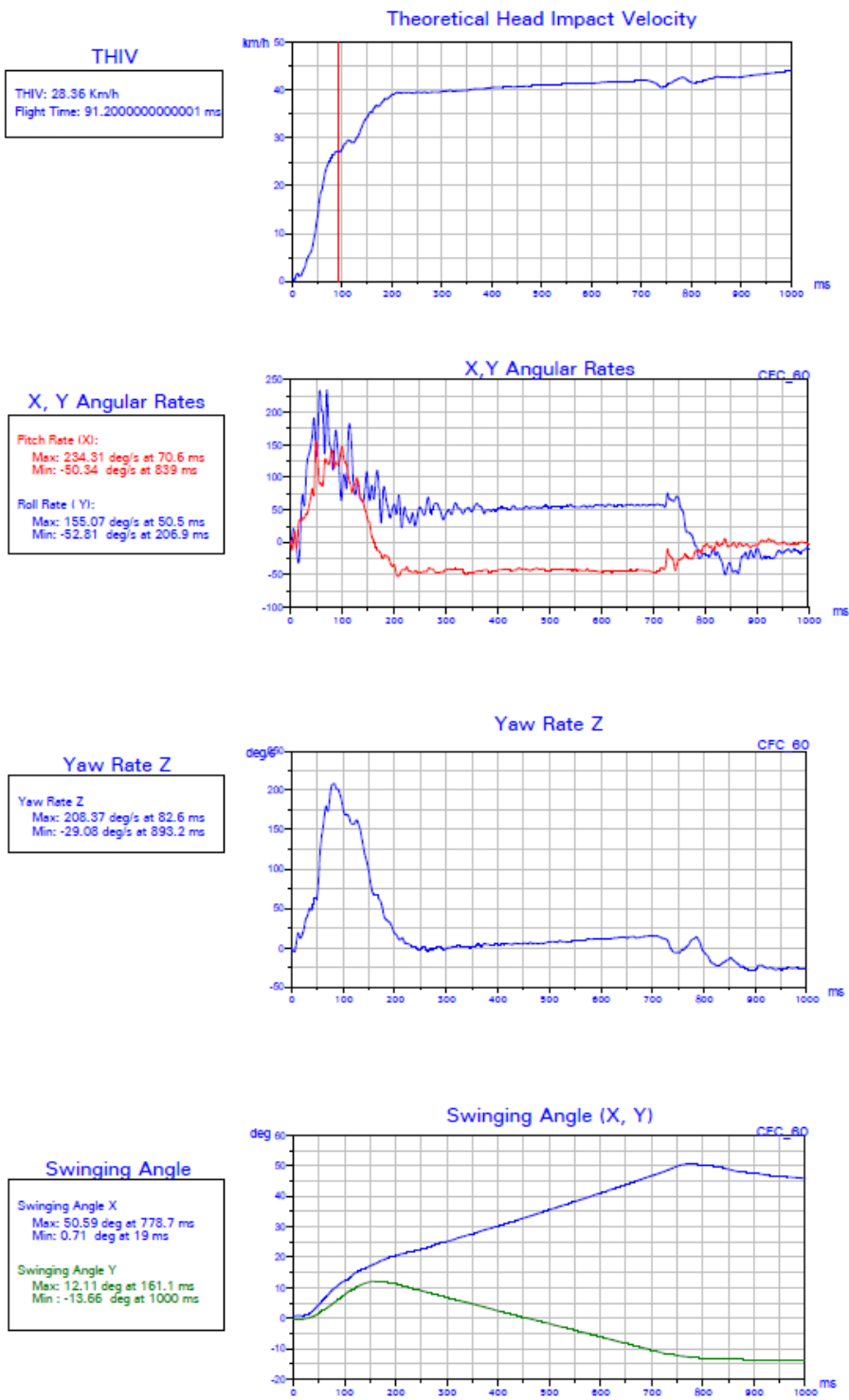


### EN-1317:2010 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.6	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	28 Km/h	THIV	0.026 %
T	Theoretical Head Flight Time	91.200 ms		







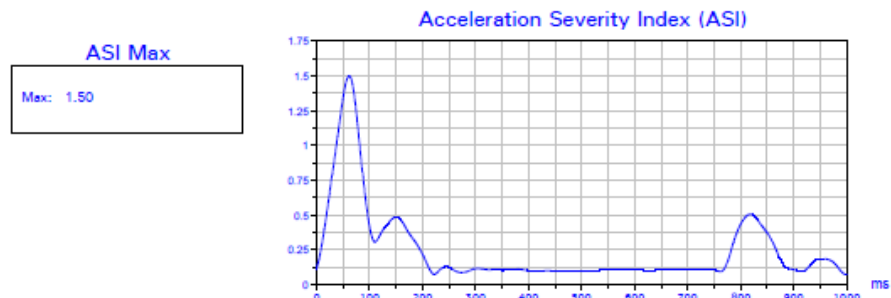
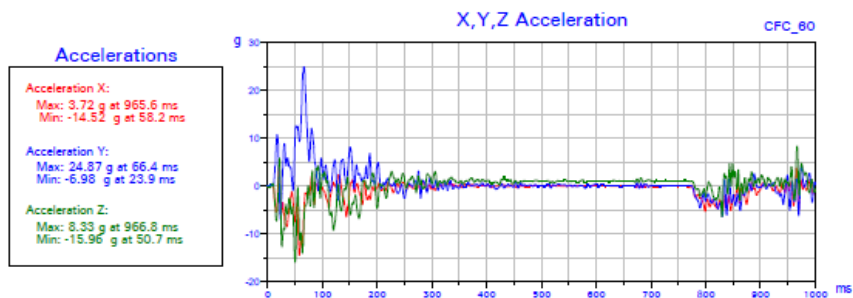
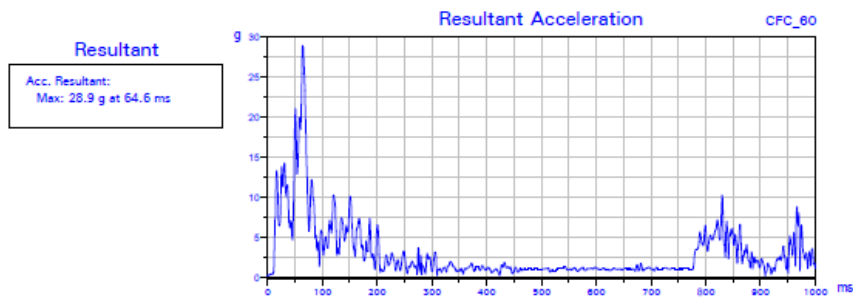
## A10.6.- PERFIL 120

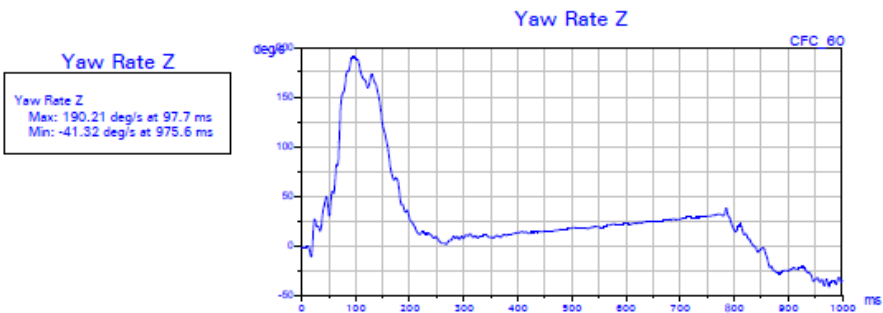
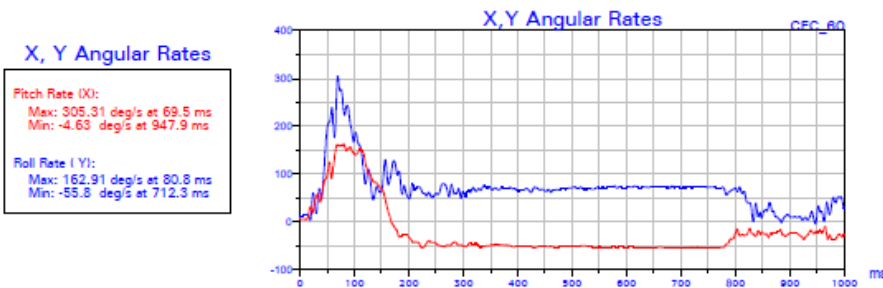
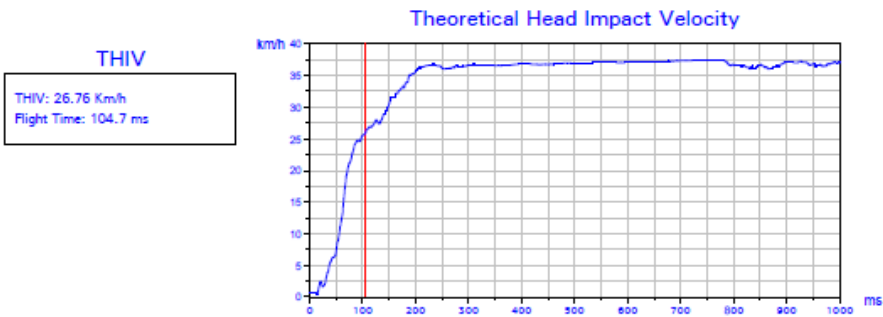
Test Number :133708AI  
 Coche 900 kg a 100 km/h contra barrera de hormigón 100.7 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (supermini / M1) / VSX000093F4069228  
 Assessed System: Barrera de Hormigon  
 Date:2013-09-12



### EN-1317:2010 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.5	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	27 Km/h	THIV	0.029 %
T	Theoretical Head Flight Time	104.700 ms		





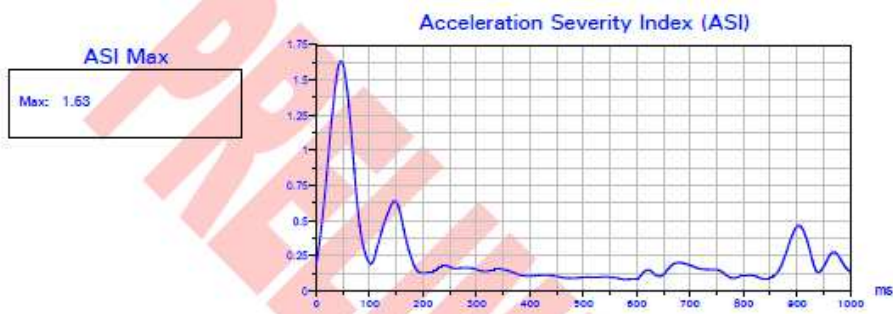
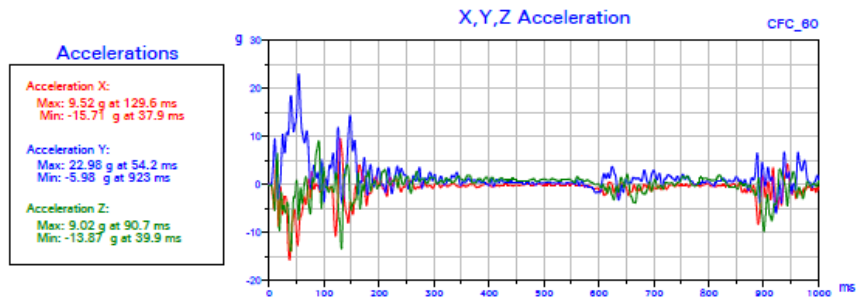
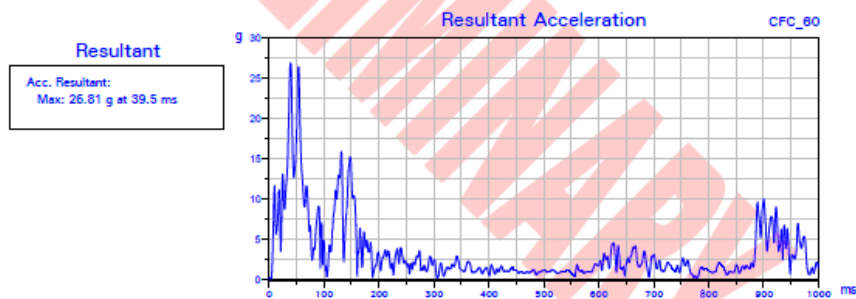
## A10.7.- PERFIL 121

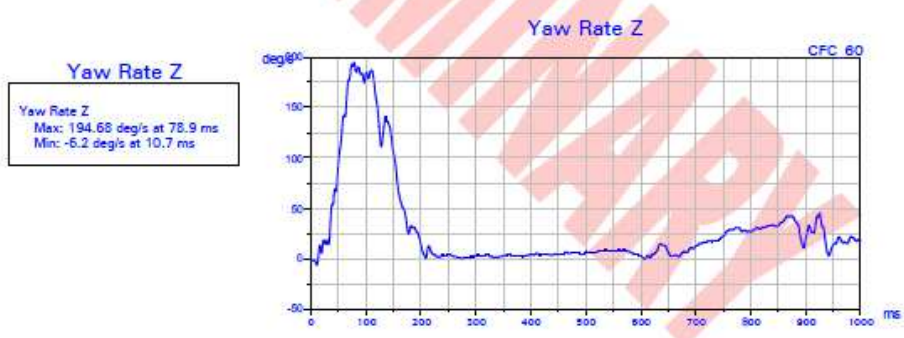
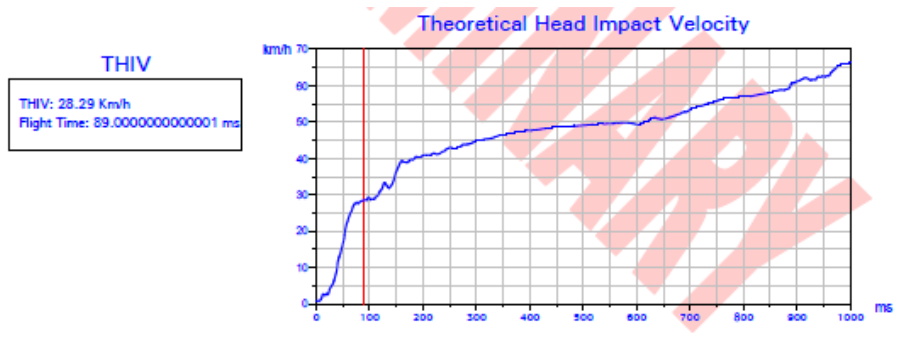
Test Number :134601A1  
 Coche 900 kg a 100 km/h contra barrera de hormigón 100 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (supermini / M1) / VSX000098L4101940  
 Assessed System: Barrera de Hormigón  
 Date:2013-11-11



### EN-1317:2010 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.6	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	28 Km/h	THIV	0.028 %
T	Theoretical Head Flight Time	89.000 ms		





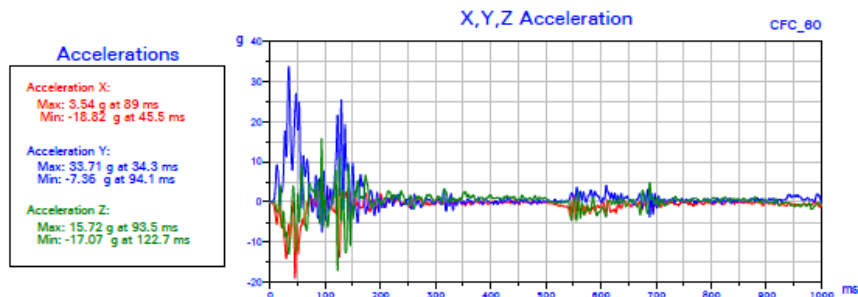
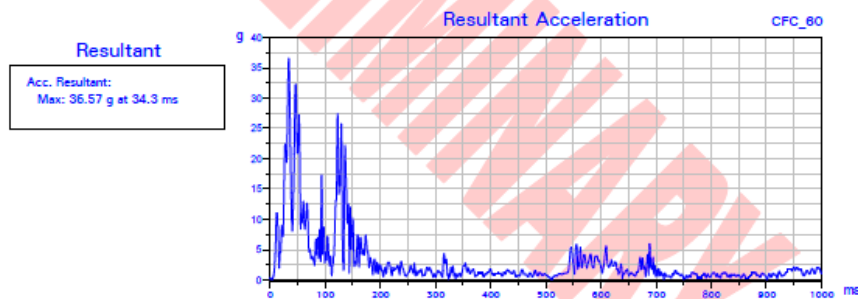
### A10.8.- PERFIL CSB (R1)

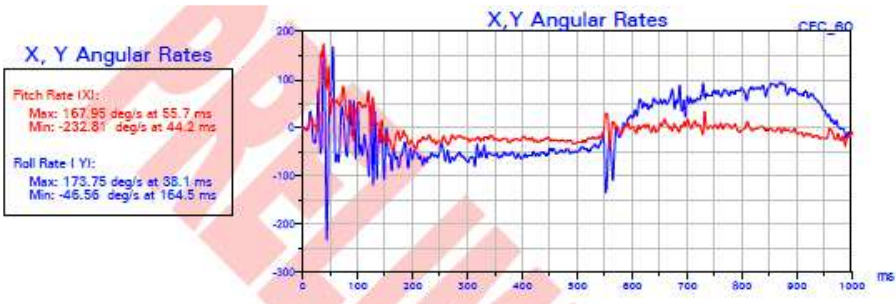
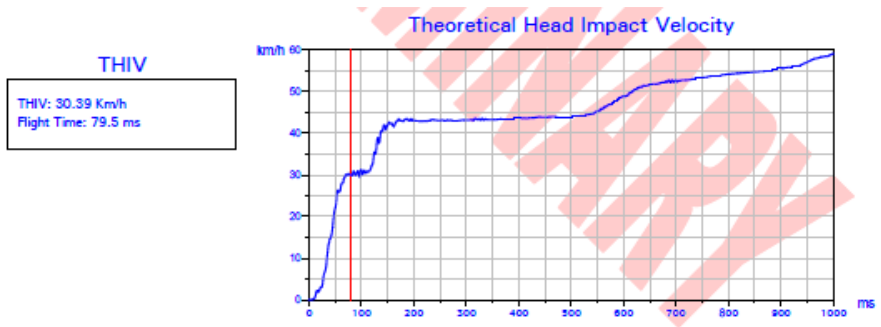
Test Number :141104AI  
 Coche 900 kg a 100 km/h contra barrera de hormigón 100.64 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (supermini / M1) / VSX000099K4308171  
 Assessed System: Barrera de Hormigón  
 Date:2014-03-11



#### EN-1317:2010 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.9	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	30 Km/h	THIV	0.024 %
T	Theoretical Head Flight Time	79.500 ms		





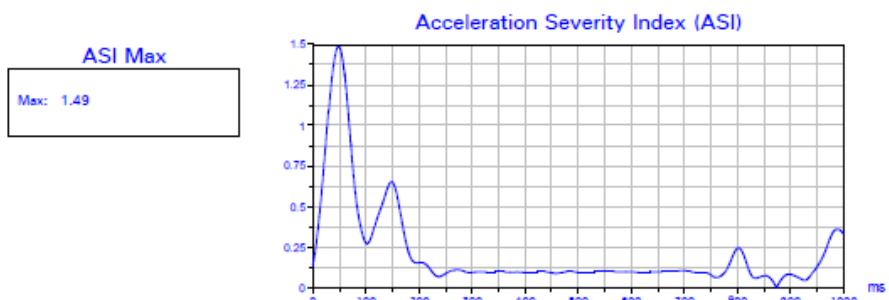
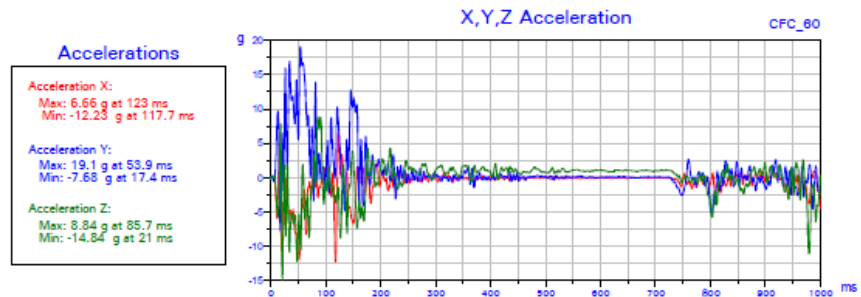
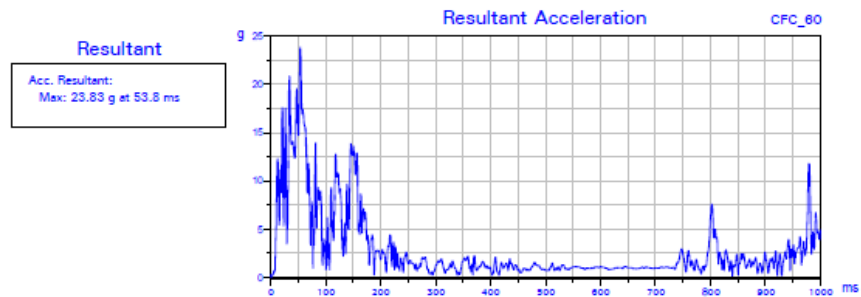
## A10.9.- PERFIL 122

Test Number :141701A1  
 Coche 900 kg a 100 km/h contra barrera de hormigón 100.4 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (supermini / M1) / VSX000099M9278650  
 Assessed System: Barrera de Hormigon  
 Date:2014-04-22



### EN-1317:2010 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.5	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	26 Km/h	THIV	0.028 %
T	Theoretical Head Flight Time	94.300 ms		

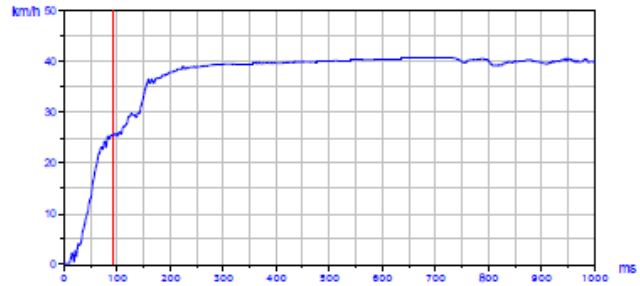




**THIV**

THIV: 25.91 Km/h  
Flight Time: 94.3000000000001 ms

**Theoretical Head Impact Velocity**

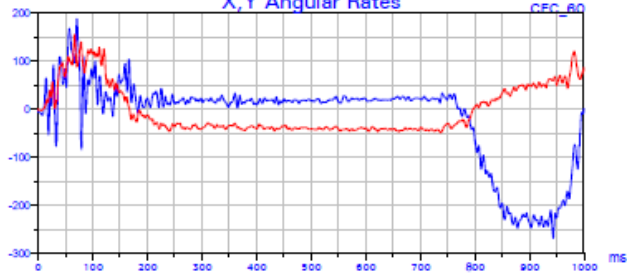


**X, Y Angular Rates**

**Pitch Rate (X):**  
Max: 188.46 deg/s at 71.2 ms  
Min: -268.66 deg/s at 943.3 ms

**Roll Rate (Y):**  
Max: 156.04 deg/s at 66.7 ms  
Min: -47.86 deg/s at 736.7 ms

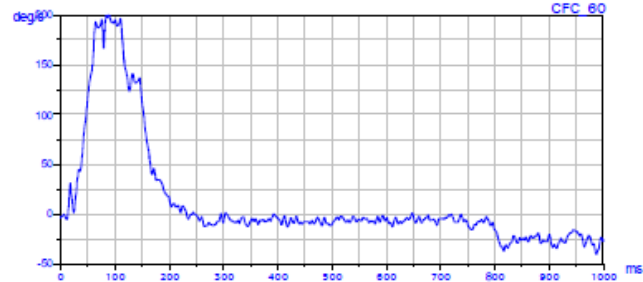
**X, Y Angular Rates**



**Yaw Rate Z**

**Yaw Rate Z**  
Max: 199.51 deg/s at 88.5 ms  
Min: -40.3 deg/s at 986.8 ms

**Yaw Rate Z**

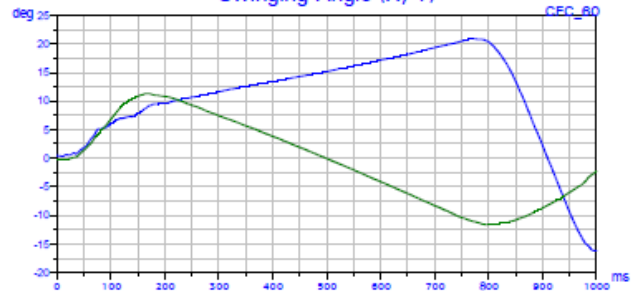


**Swinging Angle**

**Swinging Angle X**  
Max: 20.89 deg at 773 ms  
Min: -16.19 deg at 999.8 ms

**Swinging Angle Y**  
Max: 11.27 deg at 167.7 ms  
Min: -11.62 deg at 796.8 ms

**Swinging Angle (X, Y)**



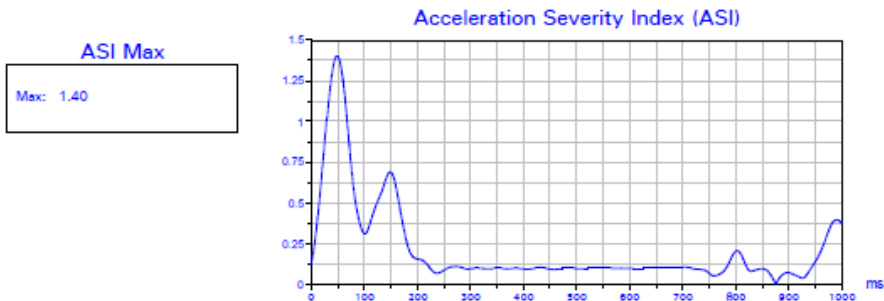
Acelerometro atrasado 7 cm por detrás del cdg

Test Number : 141701AI  
 Coche 900 kg a 100 km/h contra barrera de hormigón 100.4 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (supermini / M1) / VSX000099M9278650  
 Assessed System: Barrera de Hormigon  
 Date: 2014-04-22



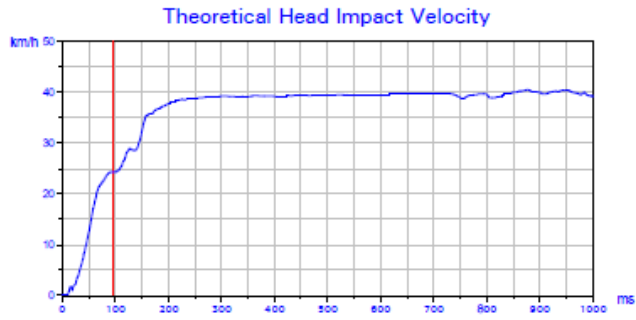
**EN-1317:2010 Crash Severity Assessment**

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.4	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	25 Km/h	THIV	0.027 %
T	Theoretical Head Flight Time	96.400 ms		



**THIV**

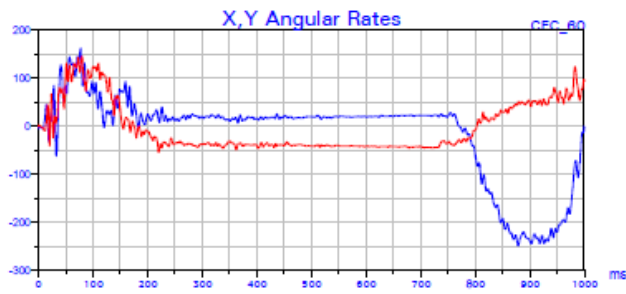
THIV: 24.77 Km/h  
Flight Time: 96.4 ms



**X, Y Angular Rates**

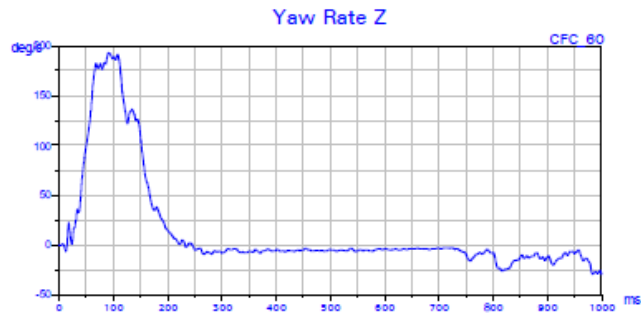
**Pitch Rate (X):**  
Max: 162.94 deg/s at 77.5 ms  
Min: -248.95 deg/s at 878.8 ms

**Roll Rate (Y):**  
Max: 145.44 deg/s at 80.1 ms  
Min: -53.44 deg/s at 220.7 ms



**Yaw Rate Z**

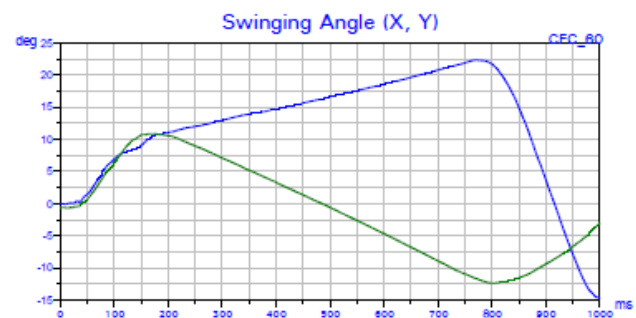
**Yaw Rate Z**  
Max: 192.92 deg/s at 91.1 ms  
Min: -29.48 deg/s at 983.2 ms



**Swinging Angle**

**Swinging Angle X**  
Max: 22.32 deg at 770 ms  
Min: -14.61 deg at 1000 ms

**Swinging Angle Y**  
Max: 10.86 deg at 167 ms  
Min: -12.37 deg at 802.6 ms



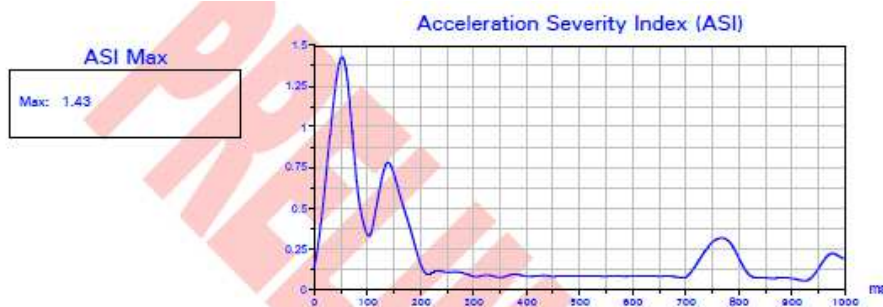
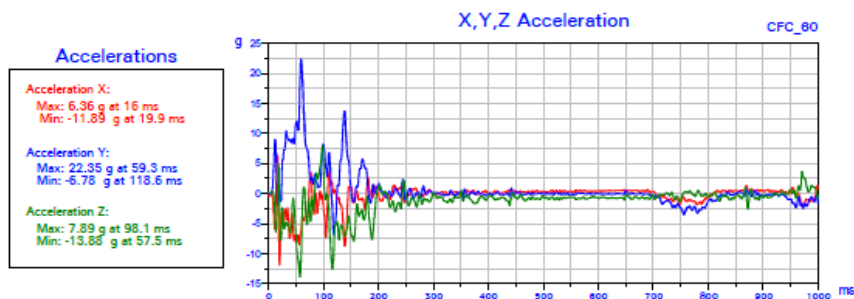
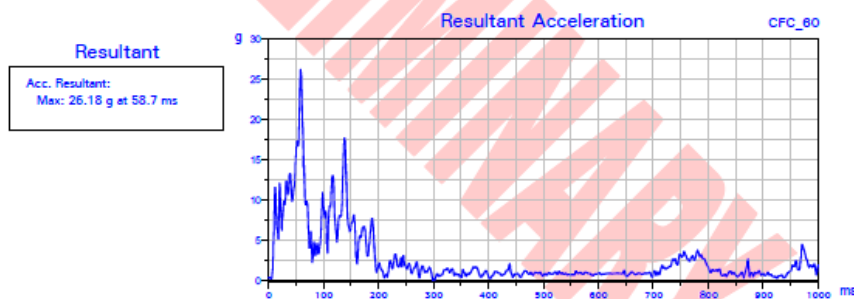
## A10.10.- PERFIL 51 3<sup>er</sup> ensayo

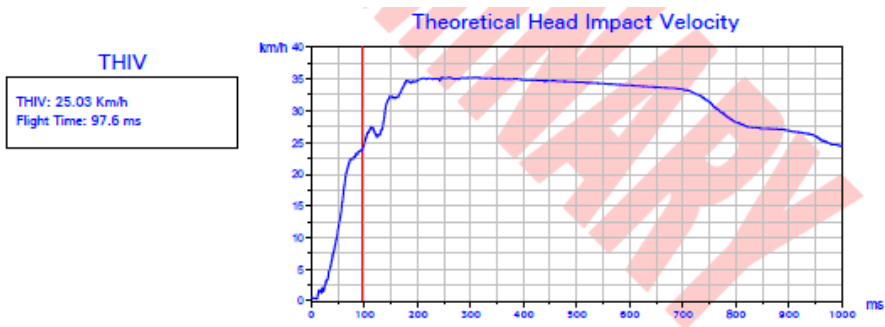
Test Number :143023AI  
 Coche 900 kg a 100 km/h contra barrera de hormigón 100 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (supermini / M1) / VSX000093N4245887  
 Assessed System: Barrera de Hormigón  
 Date:2014-07-26



### EN-1317:2010 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.4	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	25 Km/h	THIV	0.028 %
T	Theoretical Head Flight Time	97.600 ms		





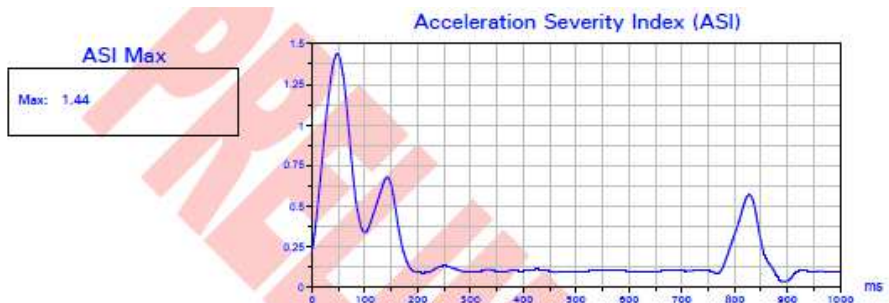
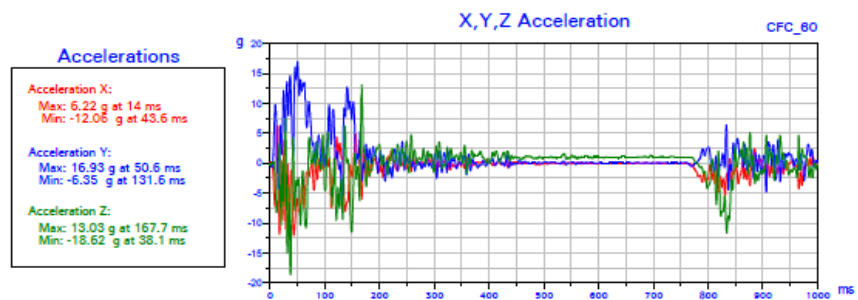
### A10.11.- PERFIL 123

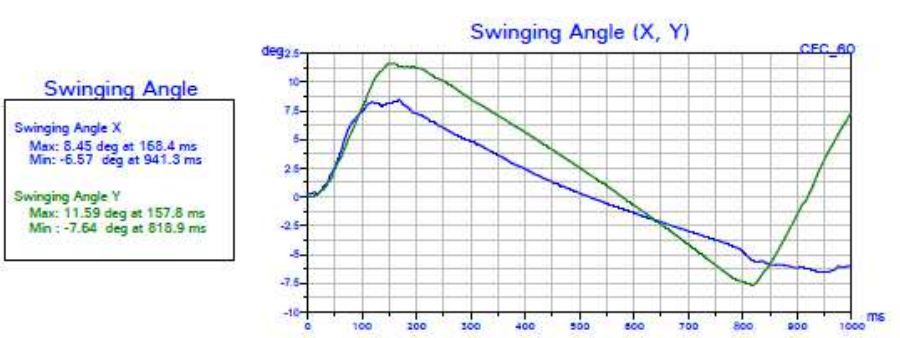
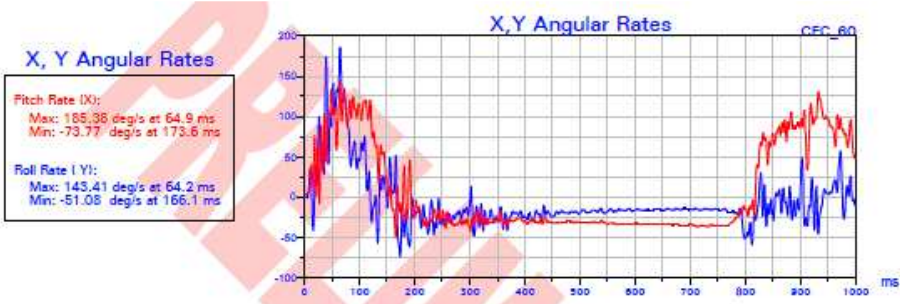
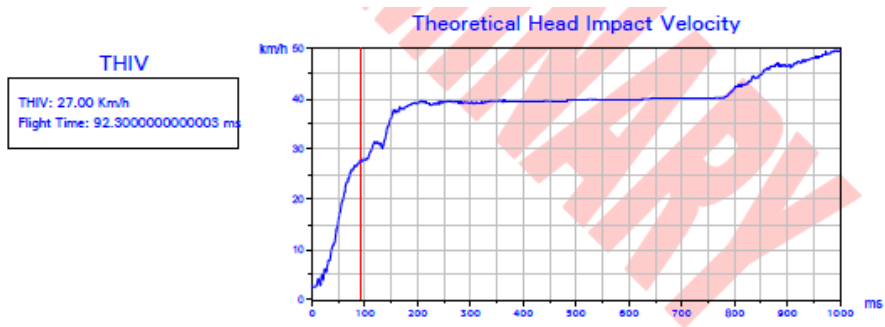
Test Number : 144414A1  
 Coche 900 kg a 100 km/h contra barrera de hormigón 100 km/h  
 Vehicle Type: Corsa (supermini / M1) / VSX000093P4103256  
 Assessed System: VEHICLE  
 Date:2014-10-31



#### EN-1317:2010 Crash Severity Assessment

Severity Indexes		Result	Uncertainty	
ASI	Acceleration Severity Index	1.4	ASI	0.000 %
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	27 Km/h	THIV	0.037 %
T	Theoretical Head Flight Time	92.300 ms		





## ANEJO 11

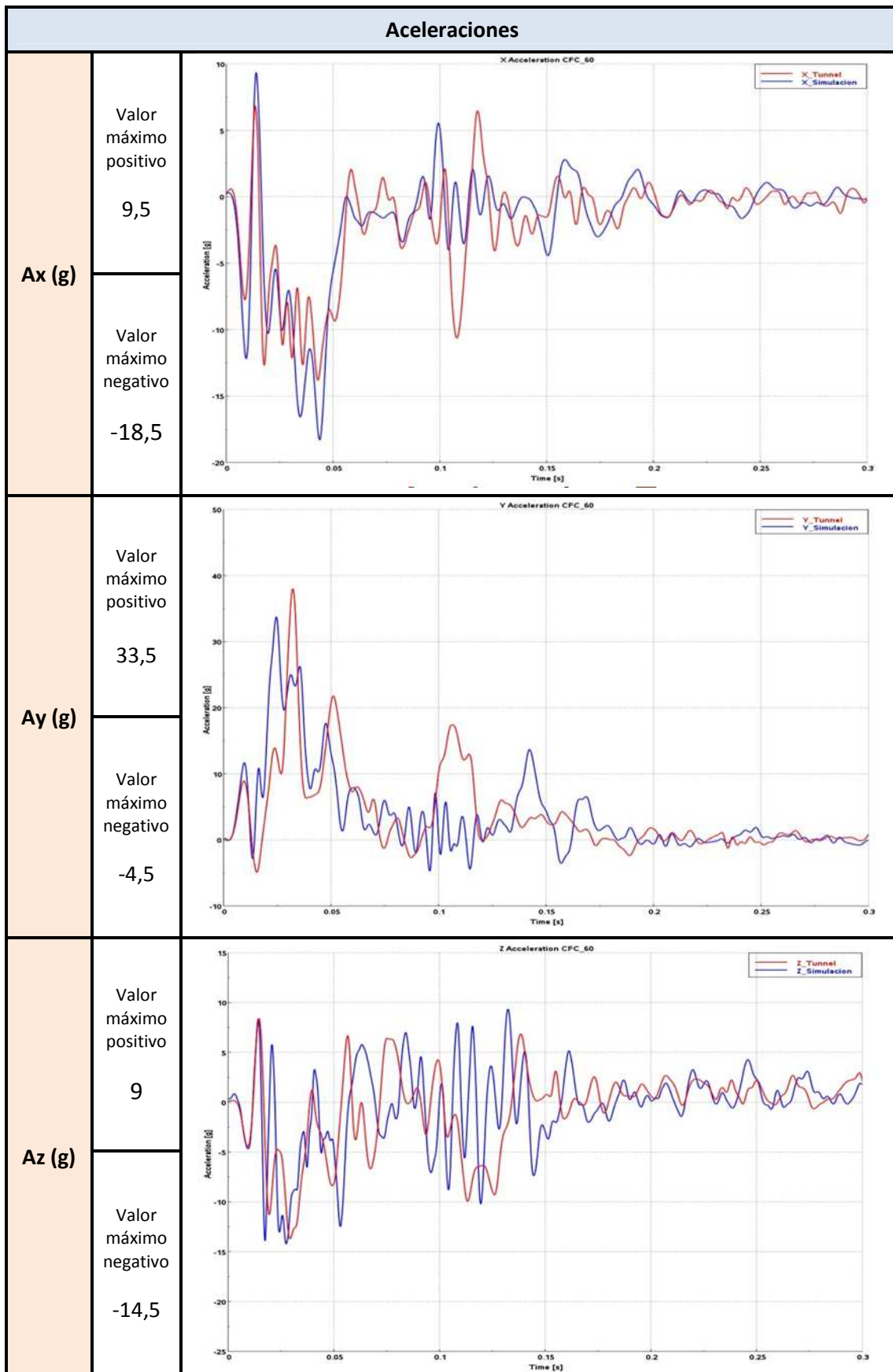
# Fichas técnicas de los perfiles simulados propuestos

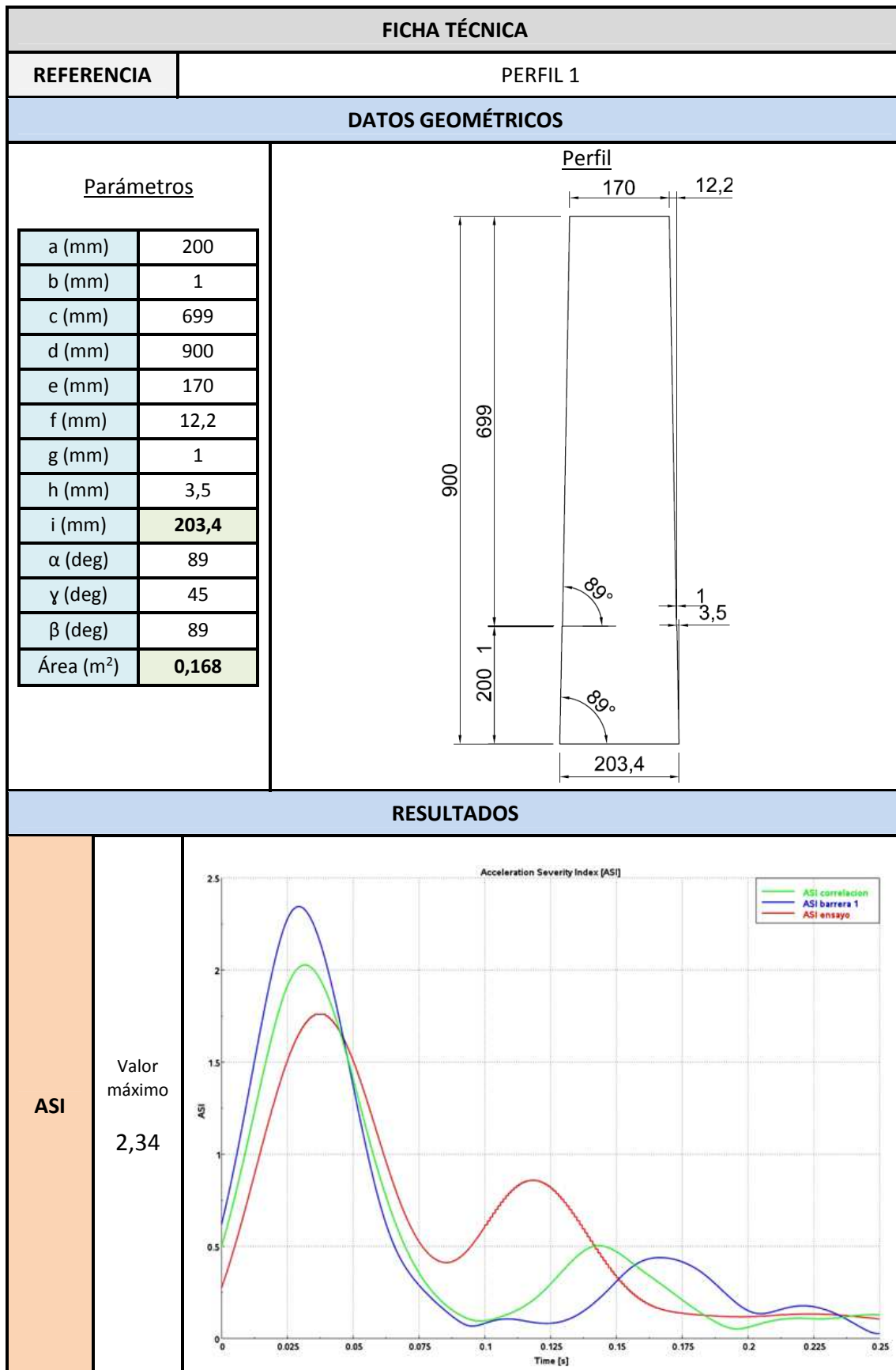
En este anejo se presenta la información técnica de cada perfil propuesto: dibujo del perfil, medidas geométricas, gráficas de las aceleraciones en X, Y y Z, y también del índice ASI.

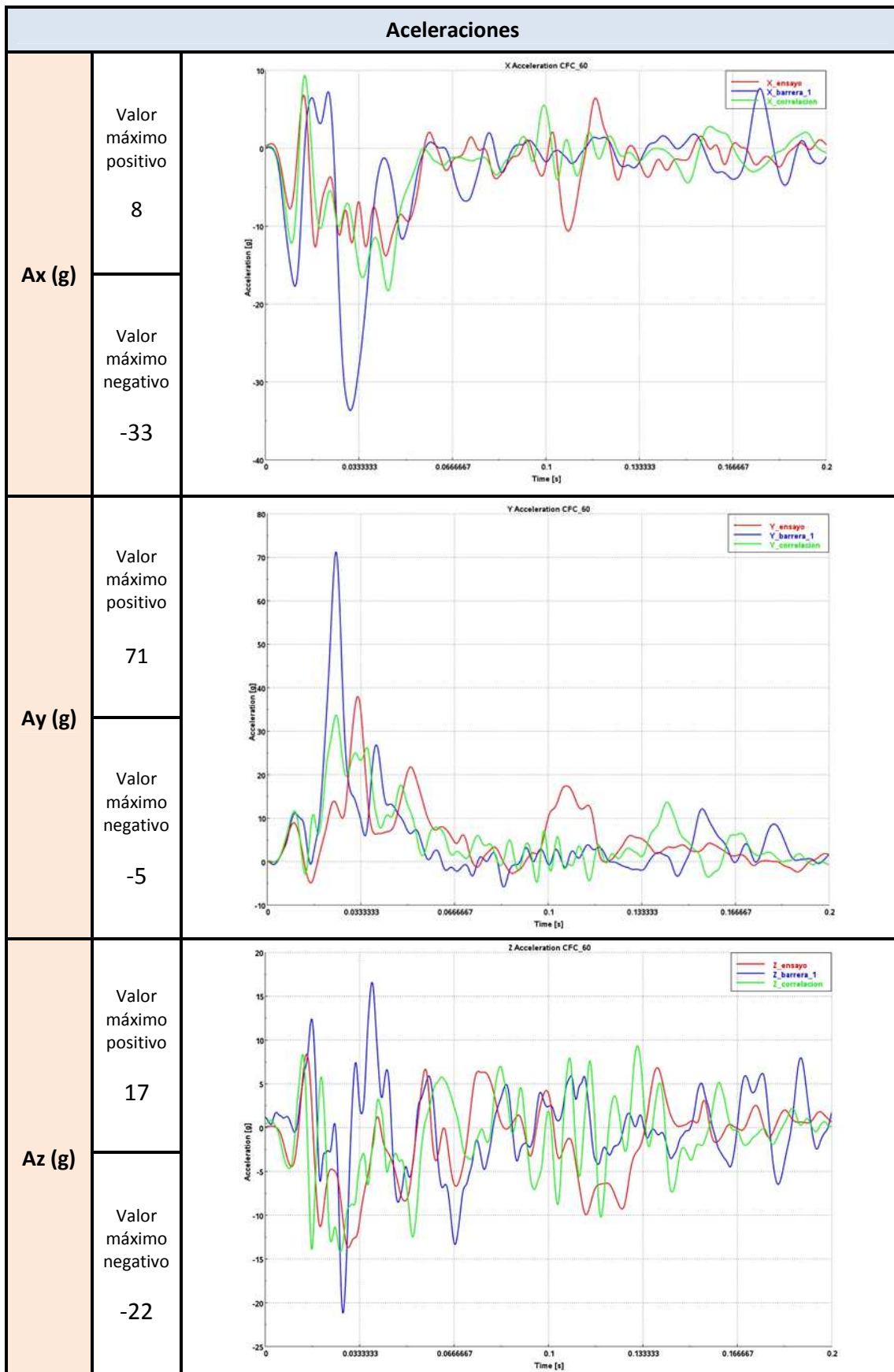


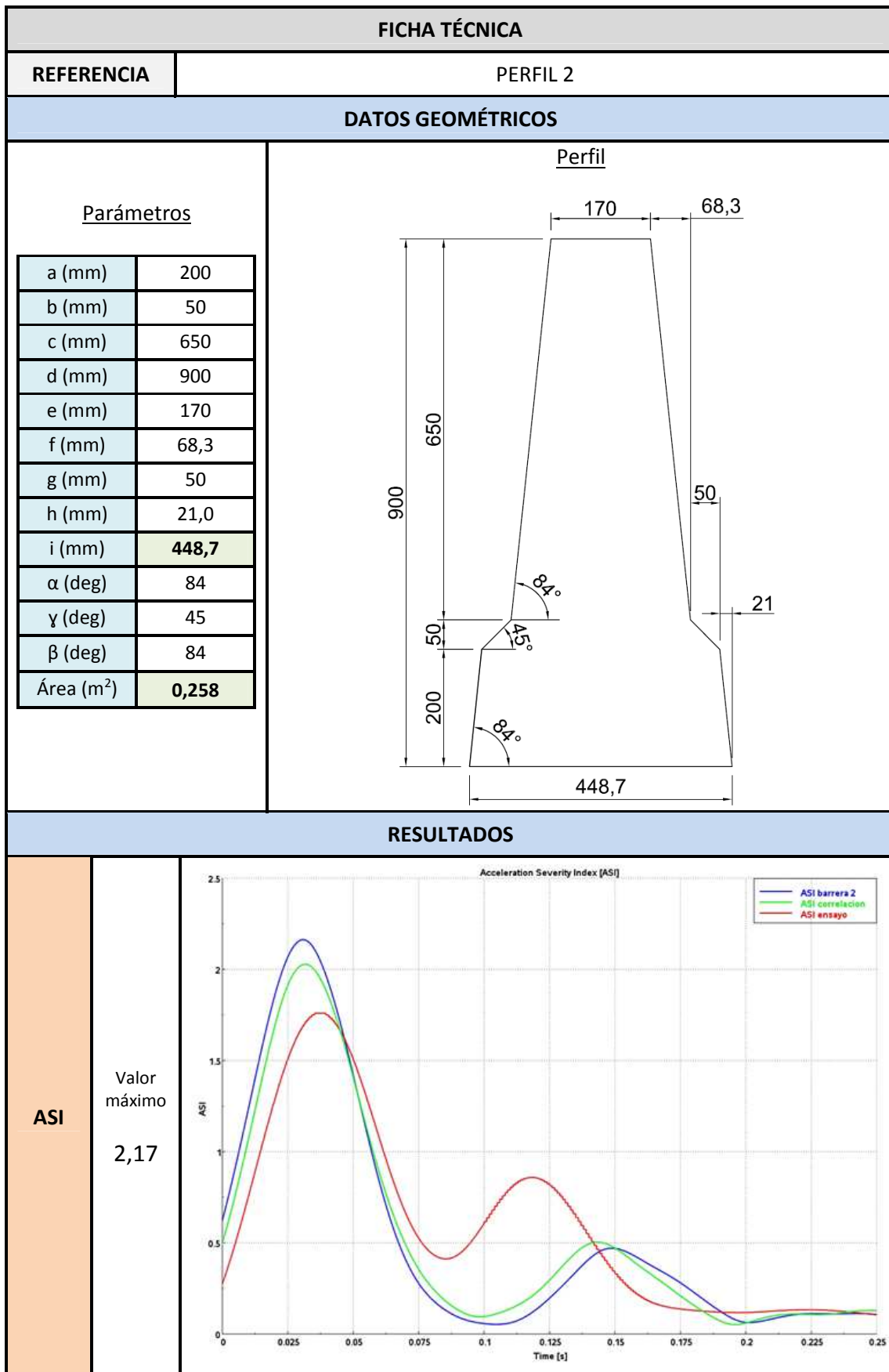


FICHA TÉCNICA	
REFERENCIA	PERFIL INICIAL (R2)
DATOS GEOMÉTRICOS	
a (mm)	240
b (mm)	85
c (mm)	545
K (mm)	-
l (mm)	-
d (mm)	870
e (mm)	170
f (mm)	96
g (mm)	60
h (mm)	42
i (mm)	566
j (mm)	-
m (mm)	-
$\alpha$ (deg)	80
$\gamma$ (deg)	55
$\beta$ (deg)	80
$\delta$ (deg)	-
$\theta$ (deg)	-
Área (m <sup>2</sup> )	0,307
<p style="text-align: center;"><b>Perfil</b></p>	
RESULTADOS	
<b>ASI</b>	<p>Valor máximo</p> <p style="font-size: 24pt; font-weight: bold;">2,04</p>

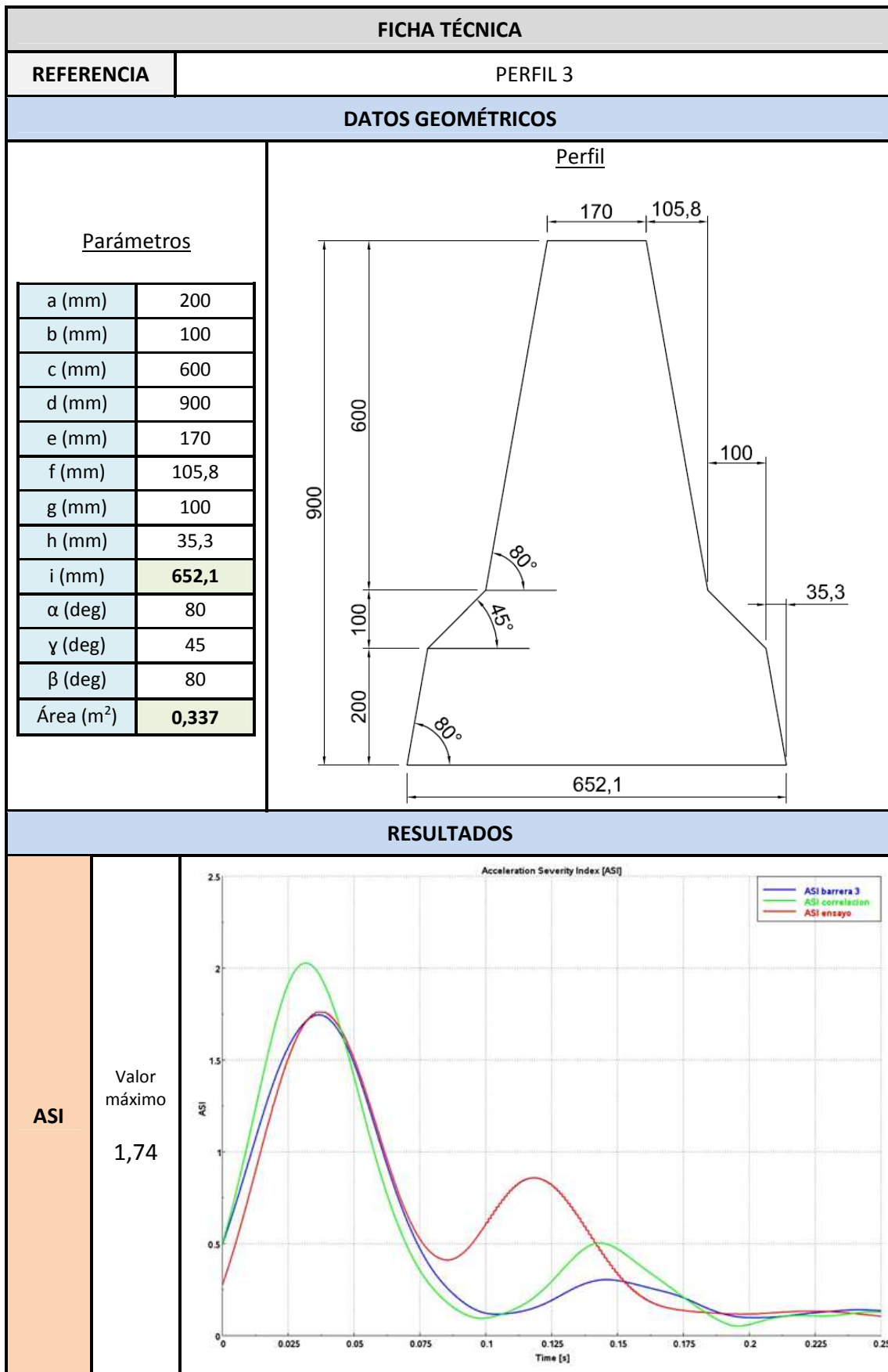




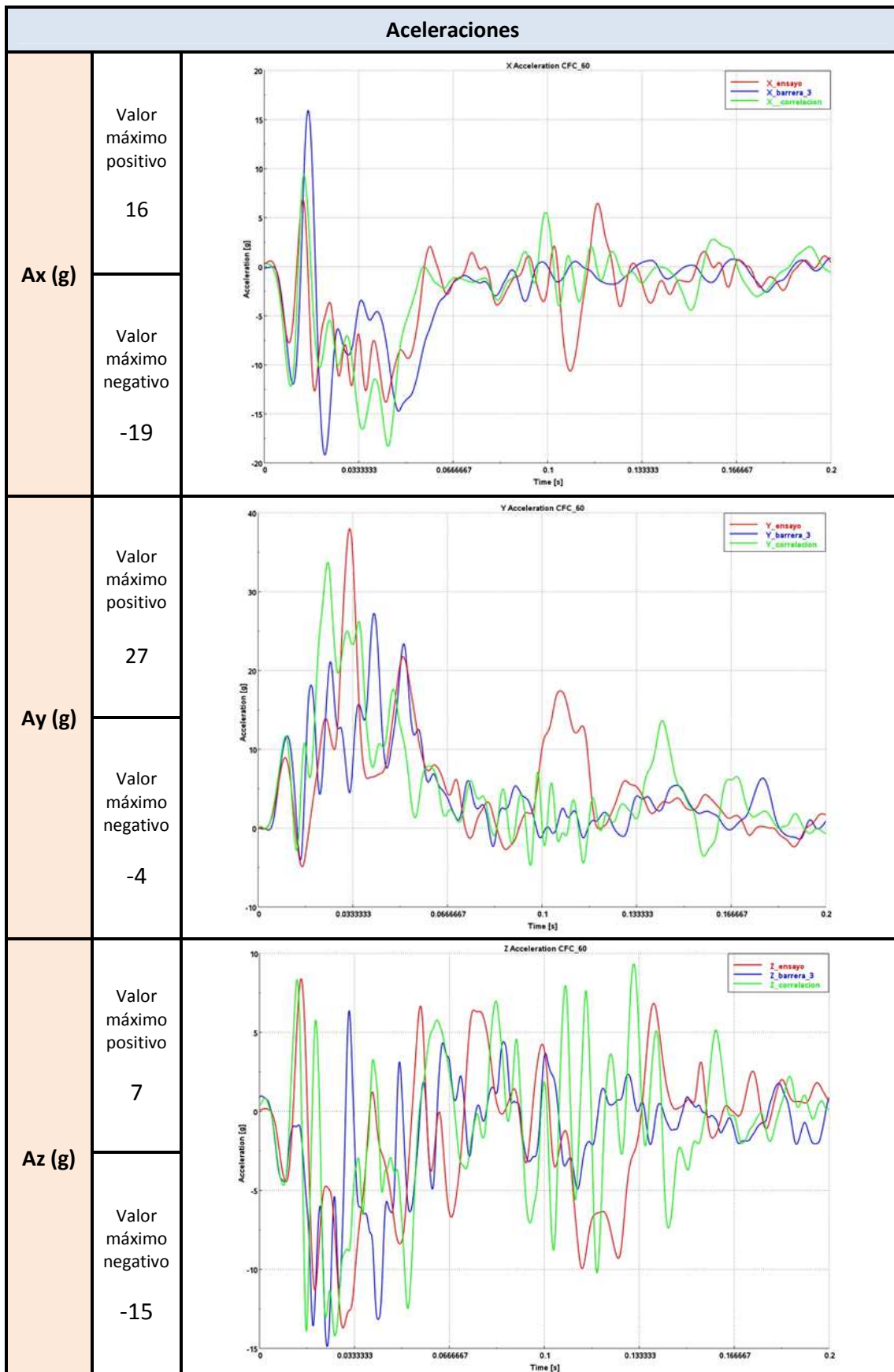


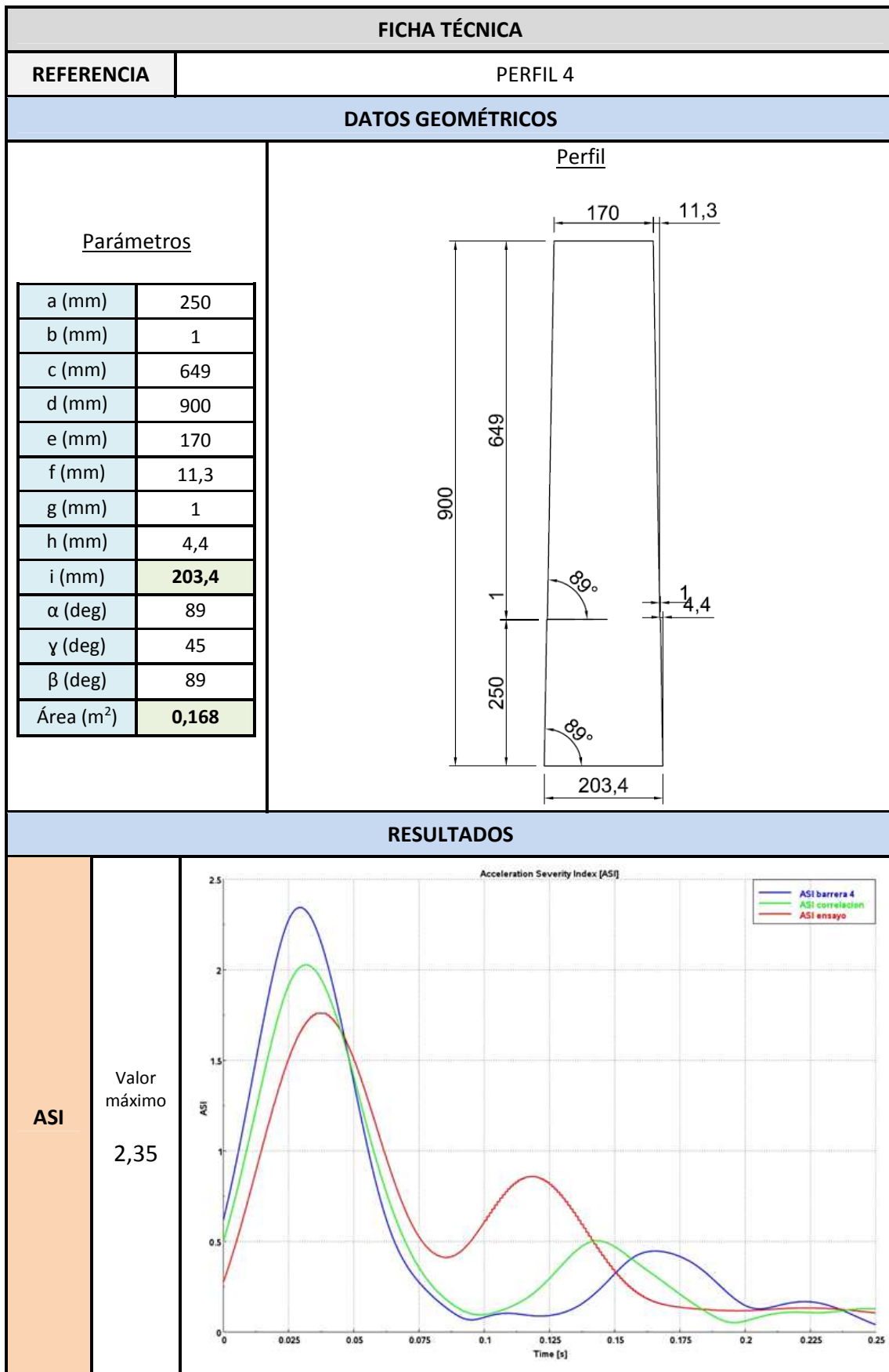


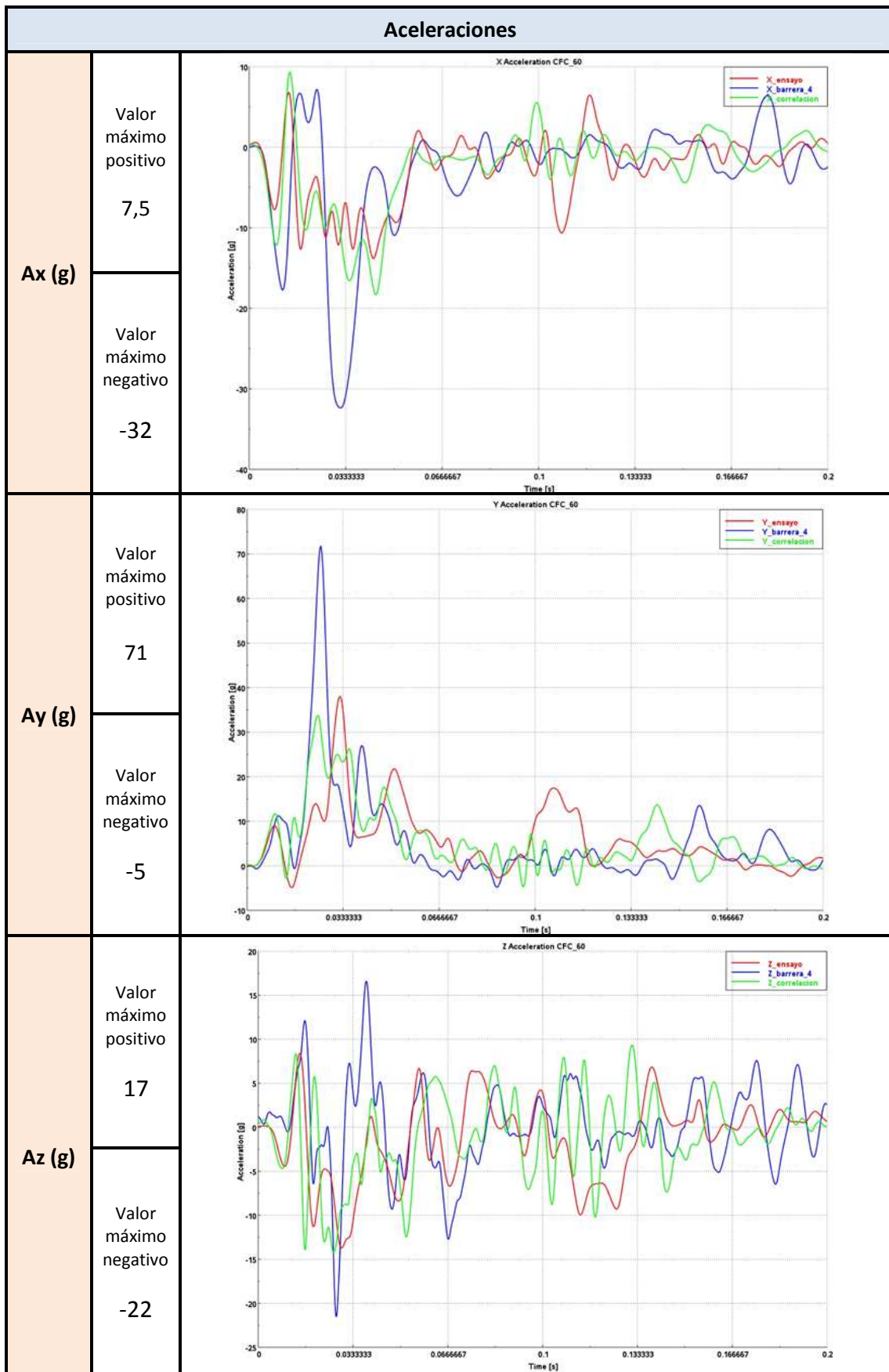
Aceleraciones			
Ax (g)	Valor máximo positivo	12	
	Valor máximo negativo	-18	
Ay (g)	Valor máximo positivo	45	
	Valor máximo negativo	-5	
Az (g)	Valor máximo positivo	9	
	Valor máximo negativo	-26	

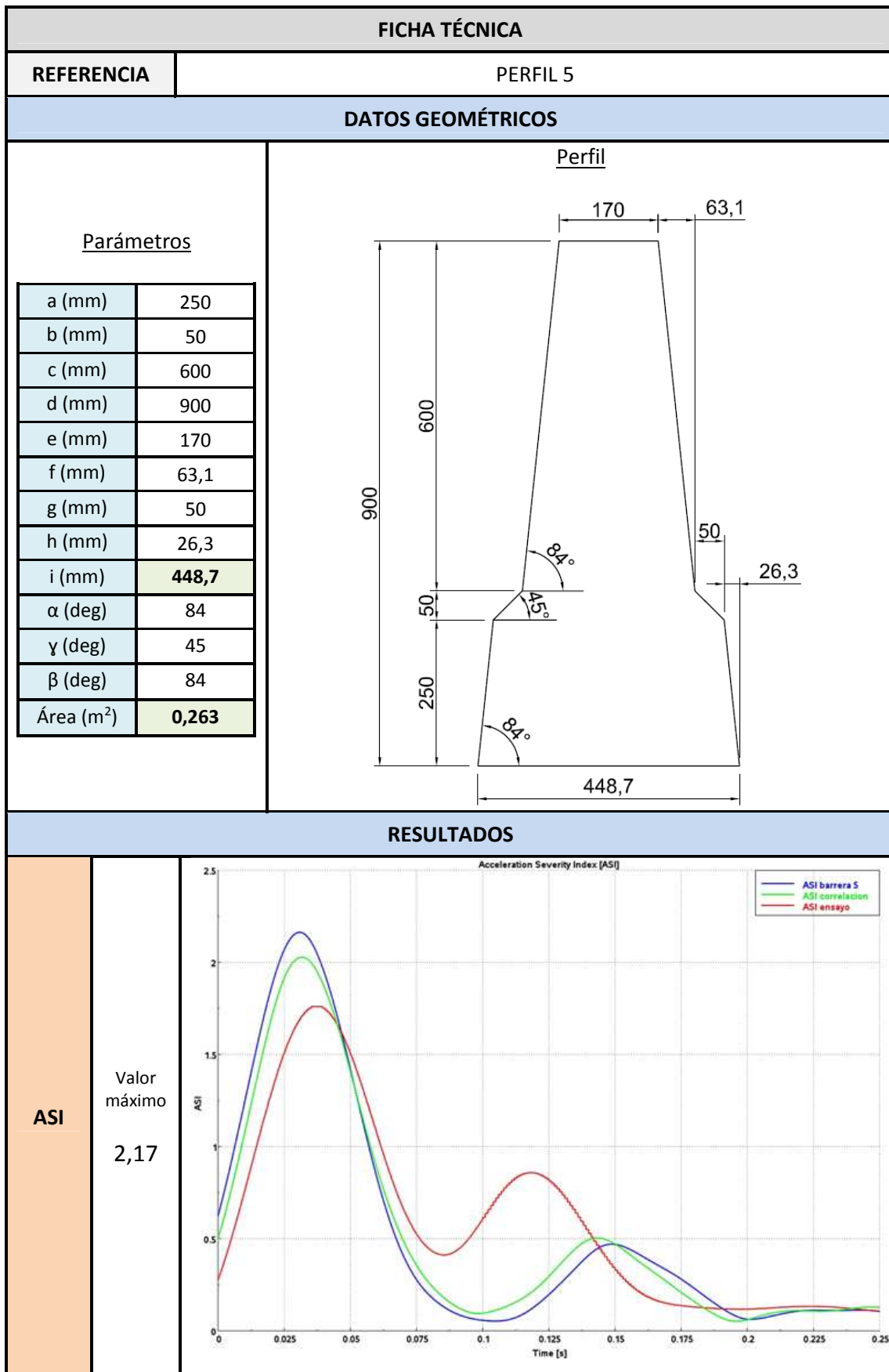


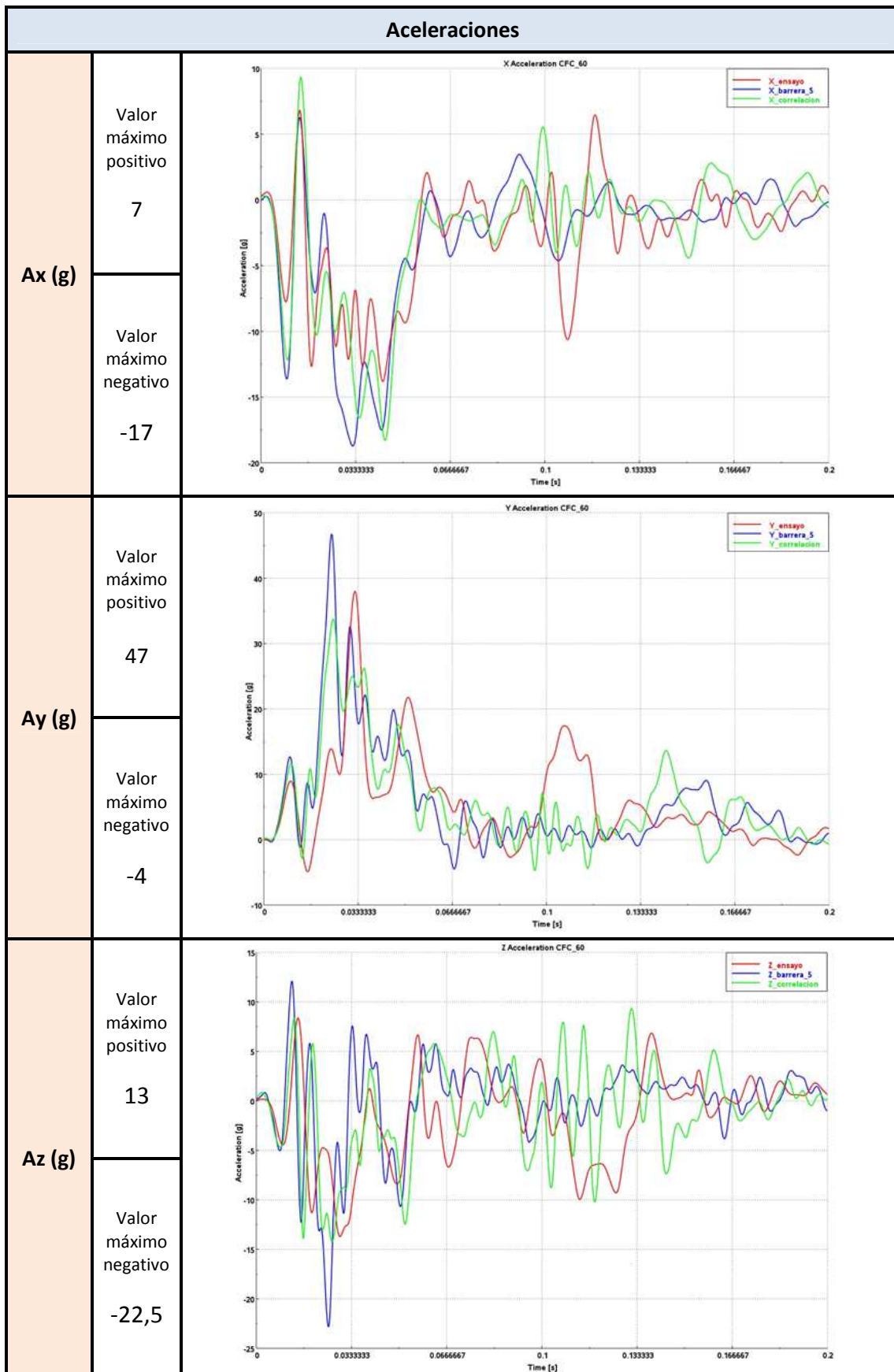


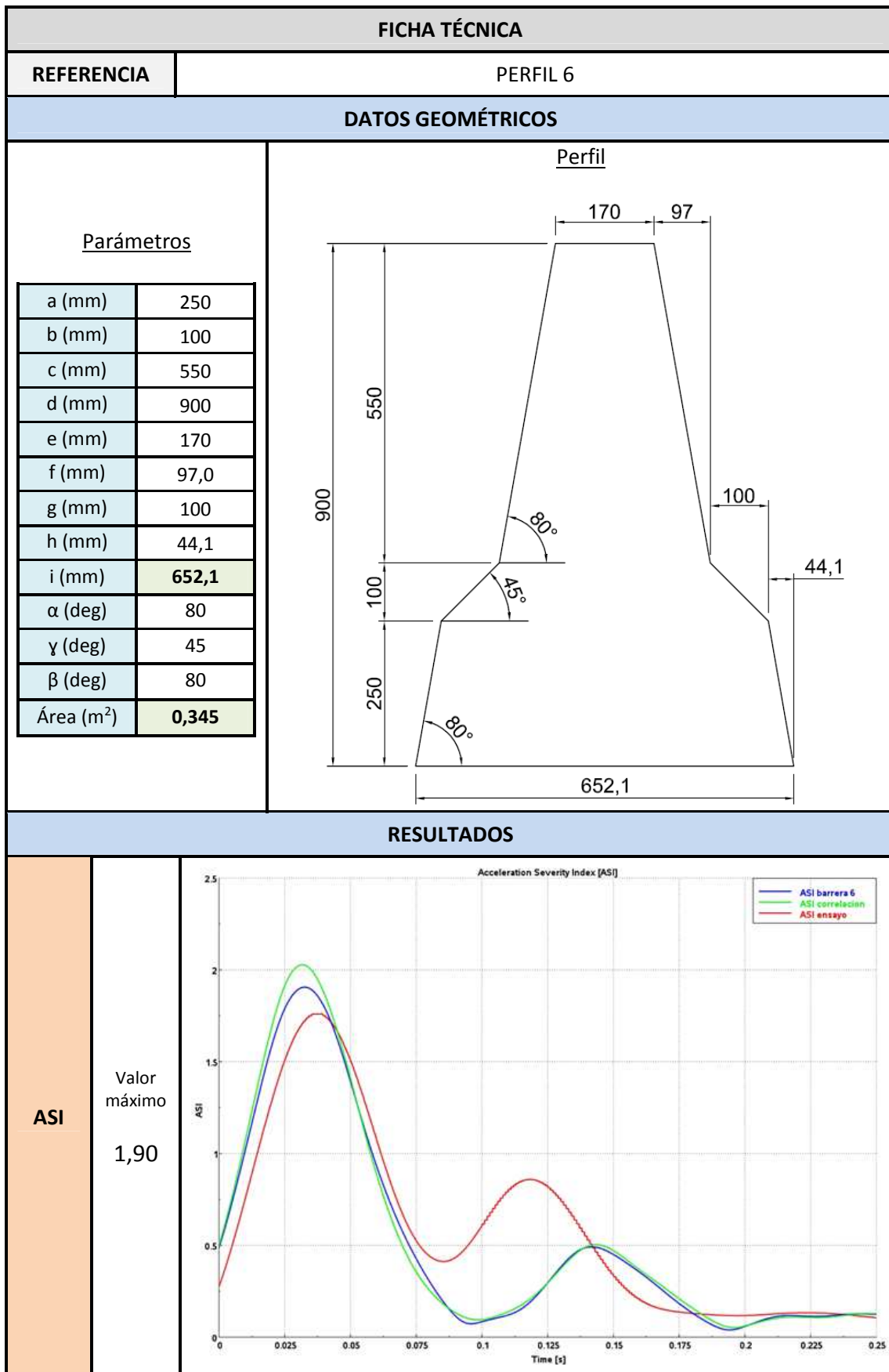


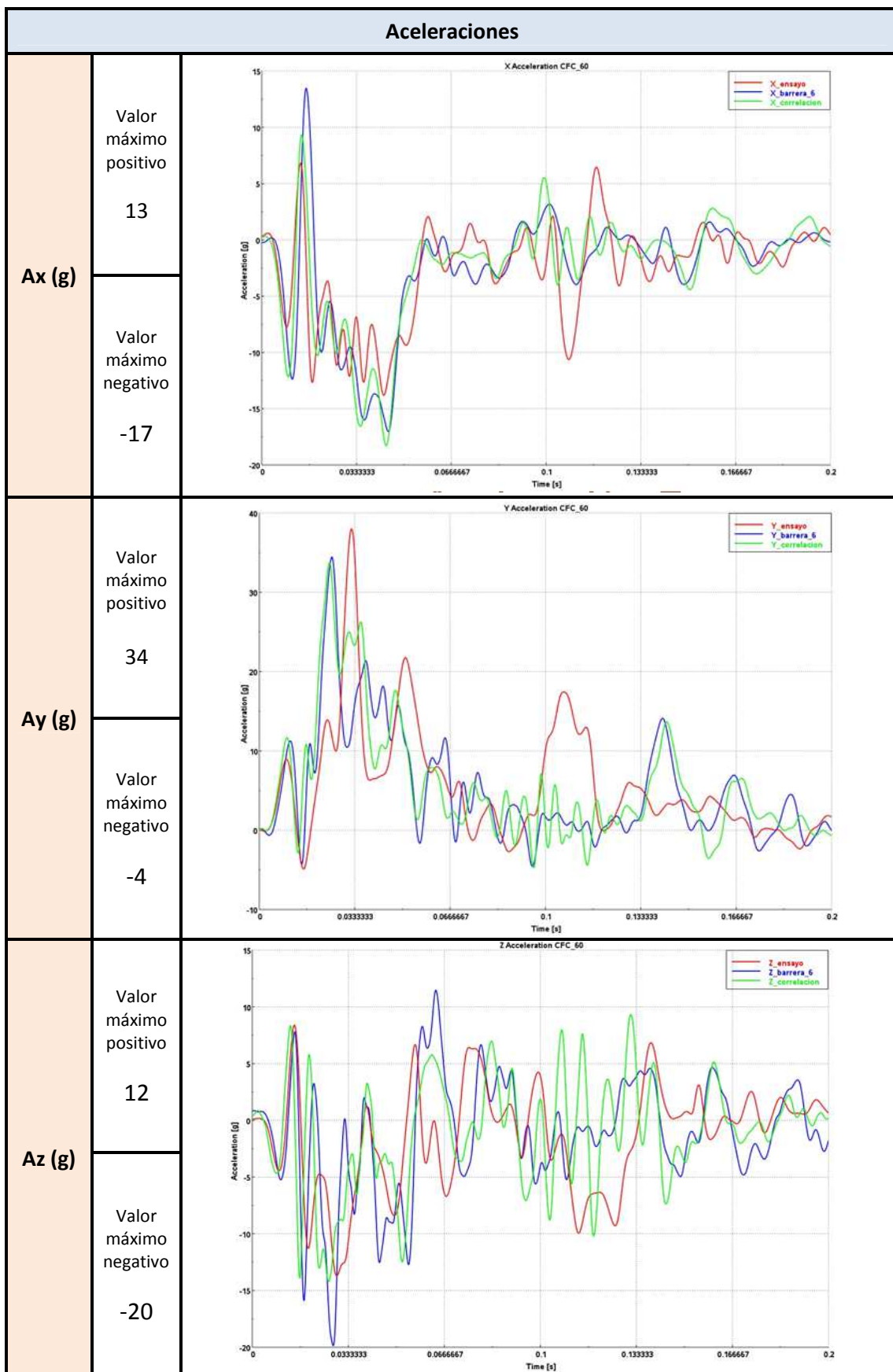


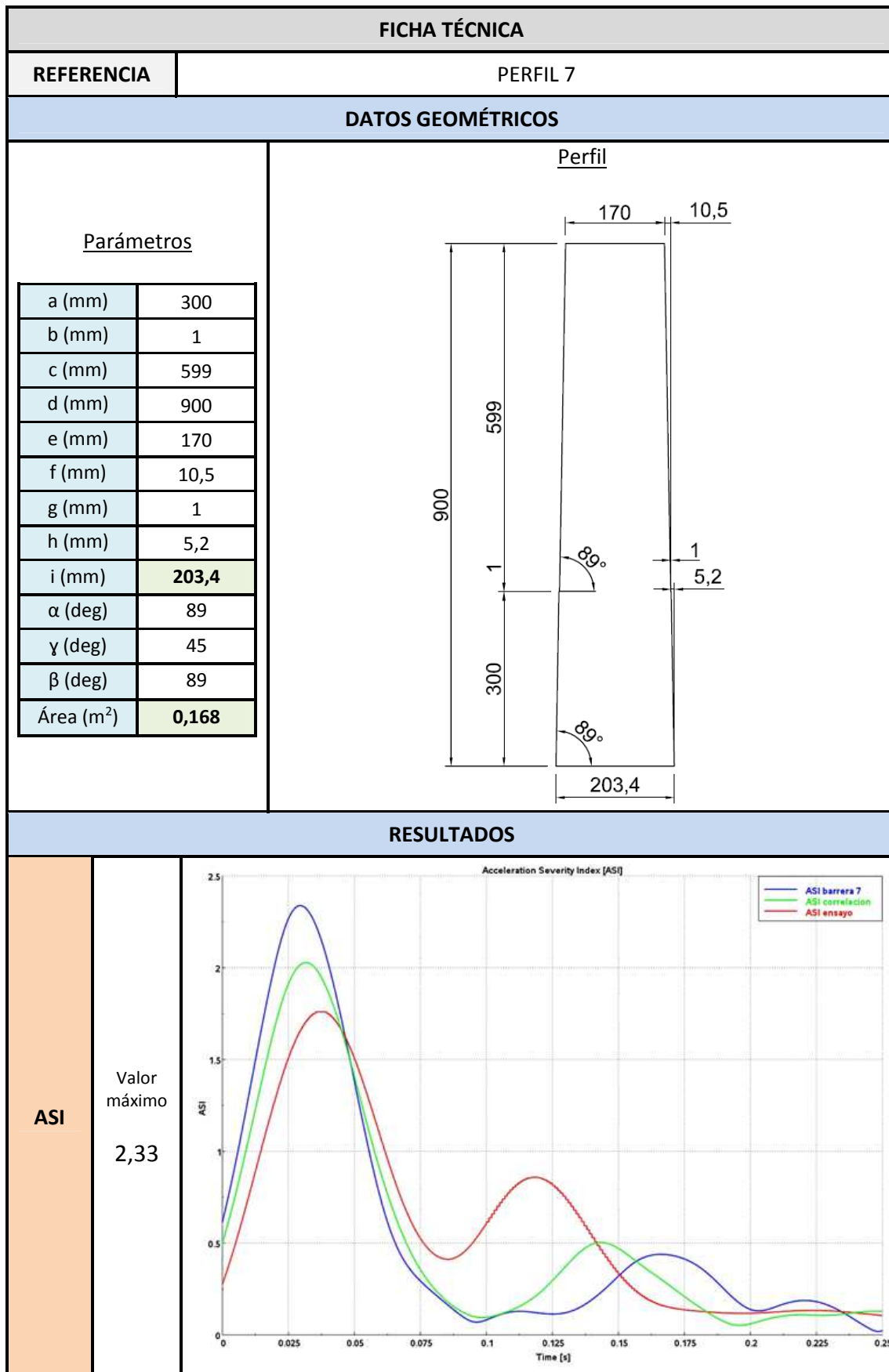




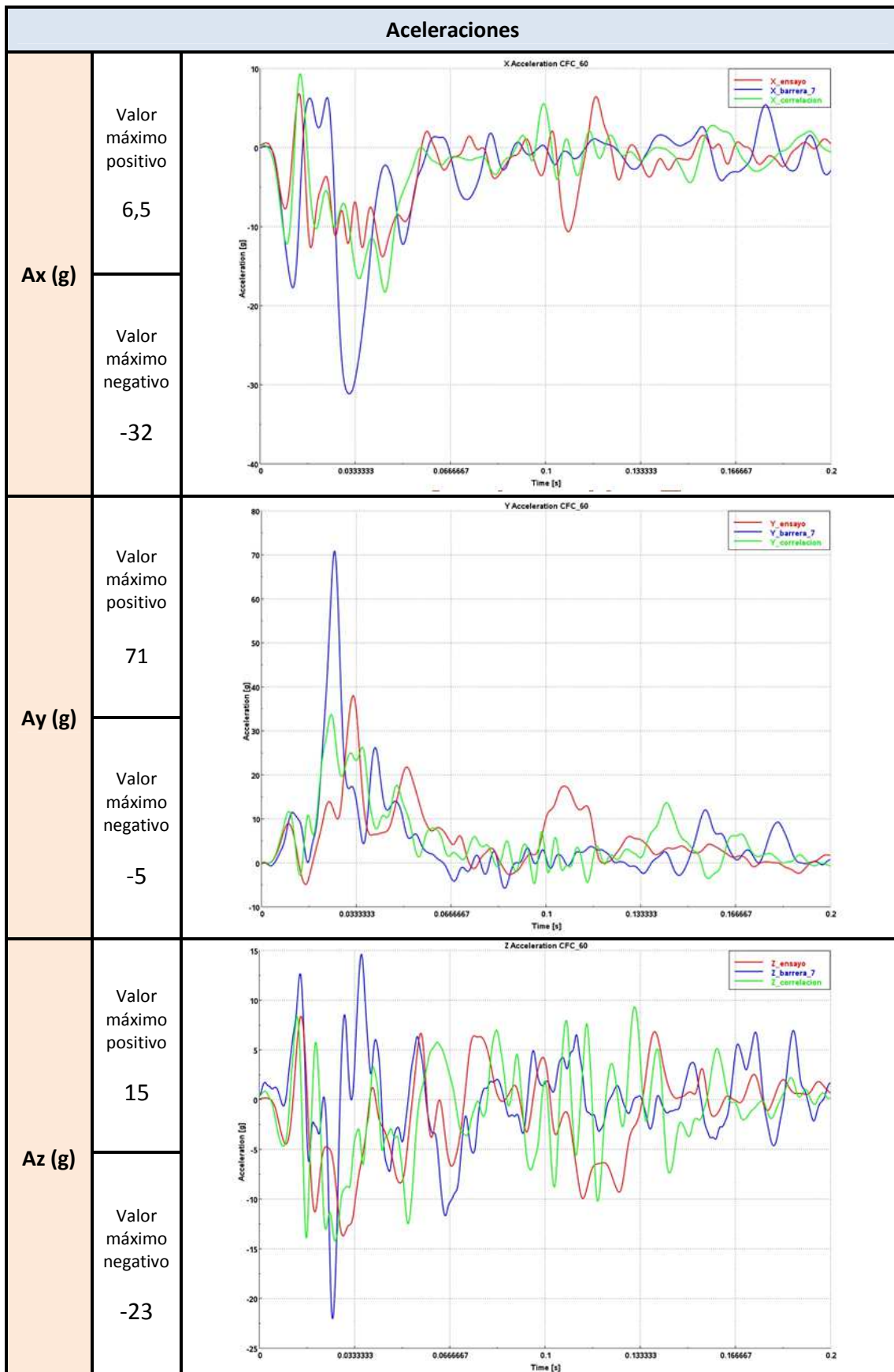


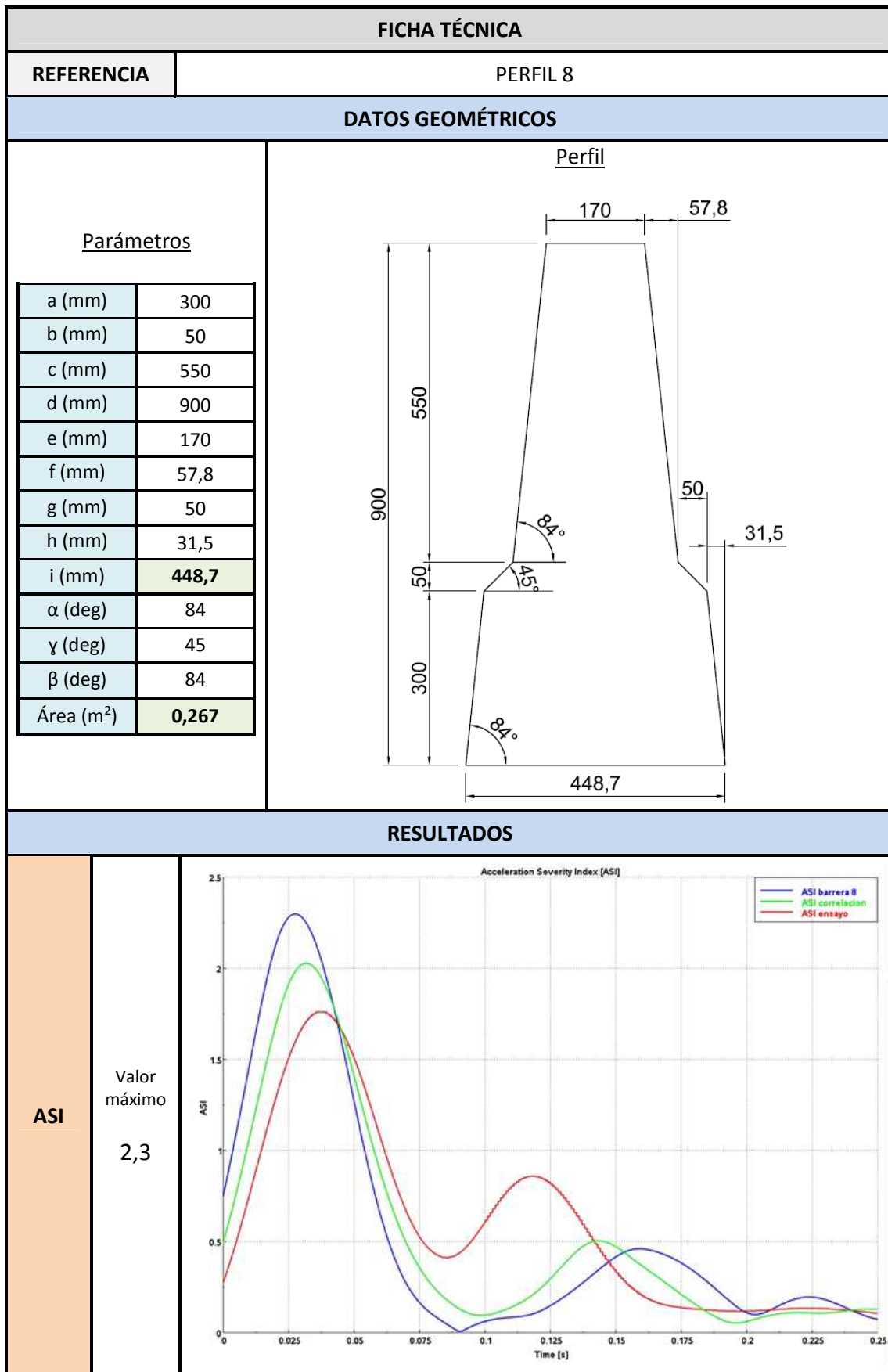


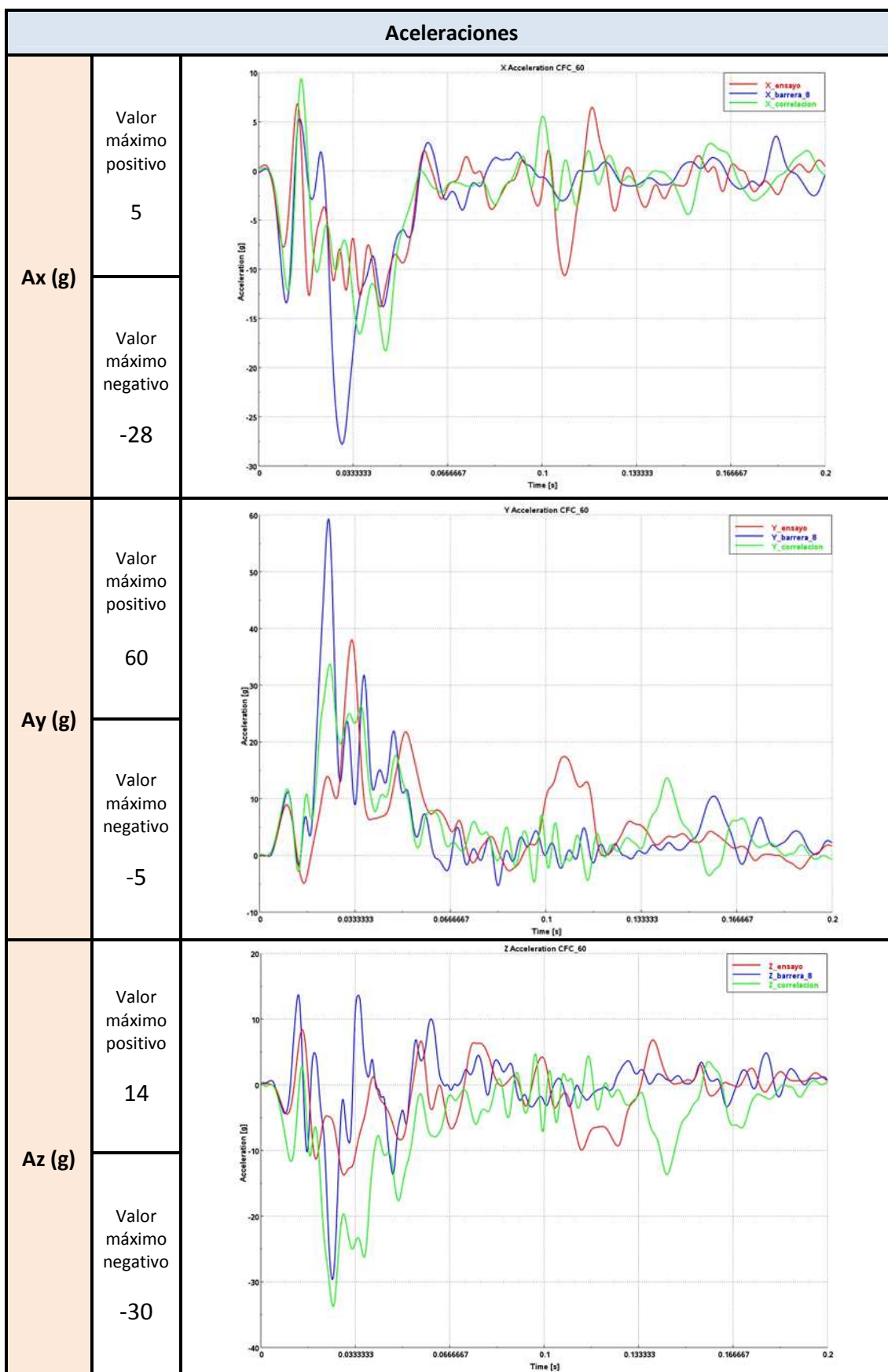


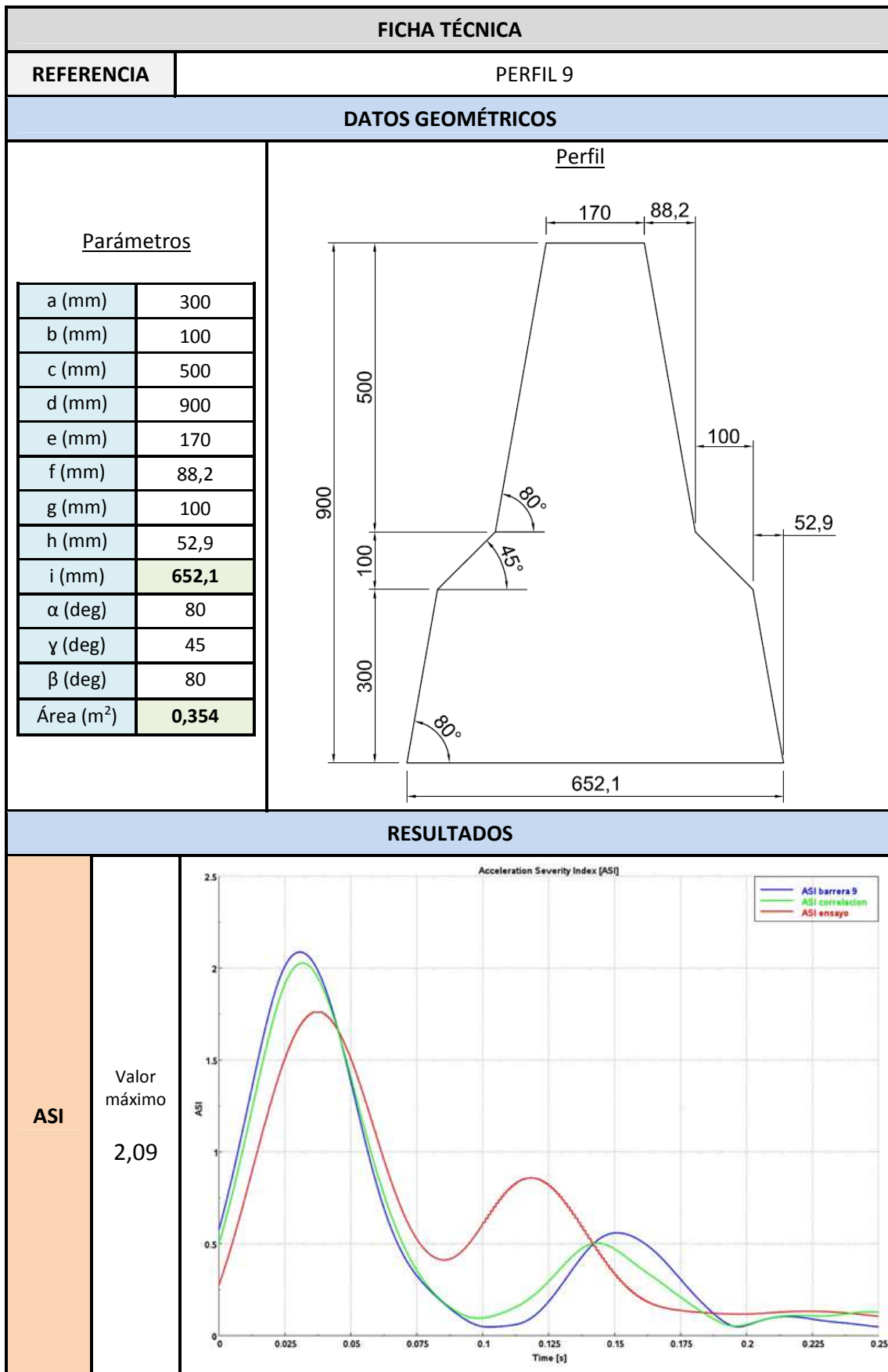




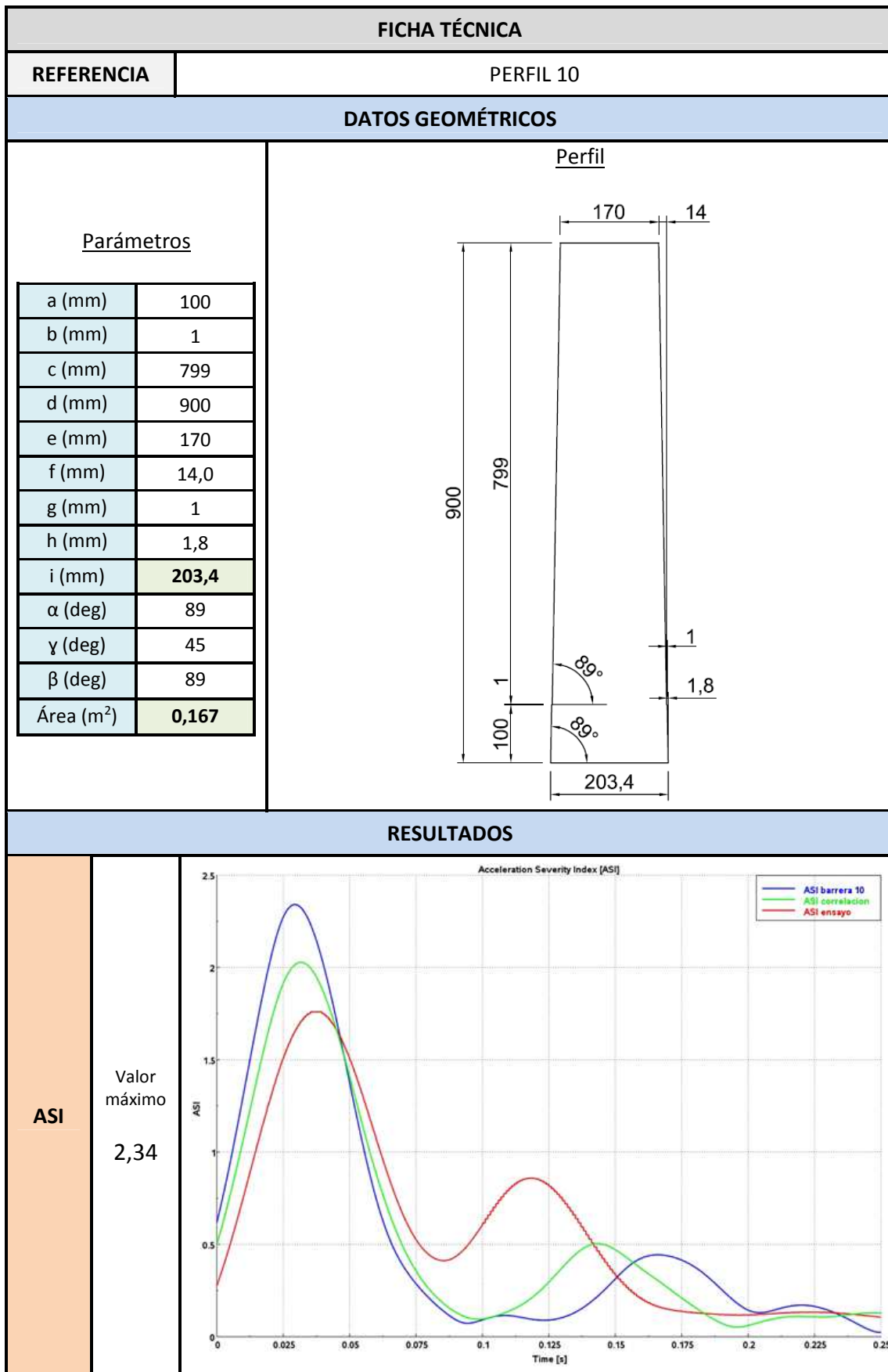




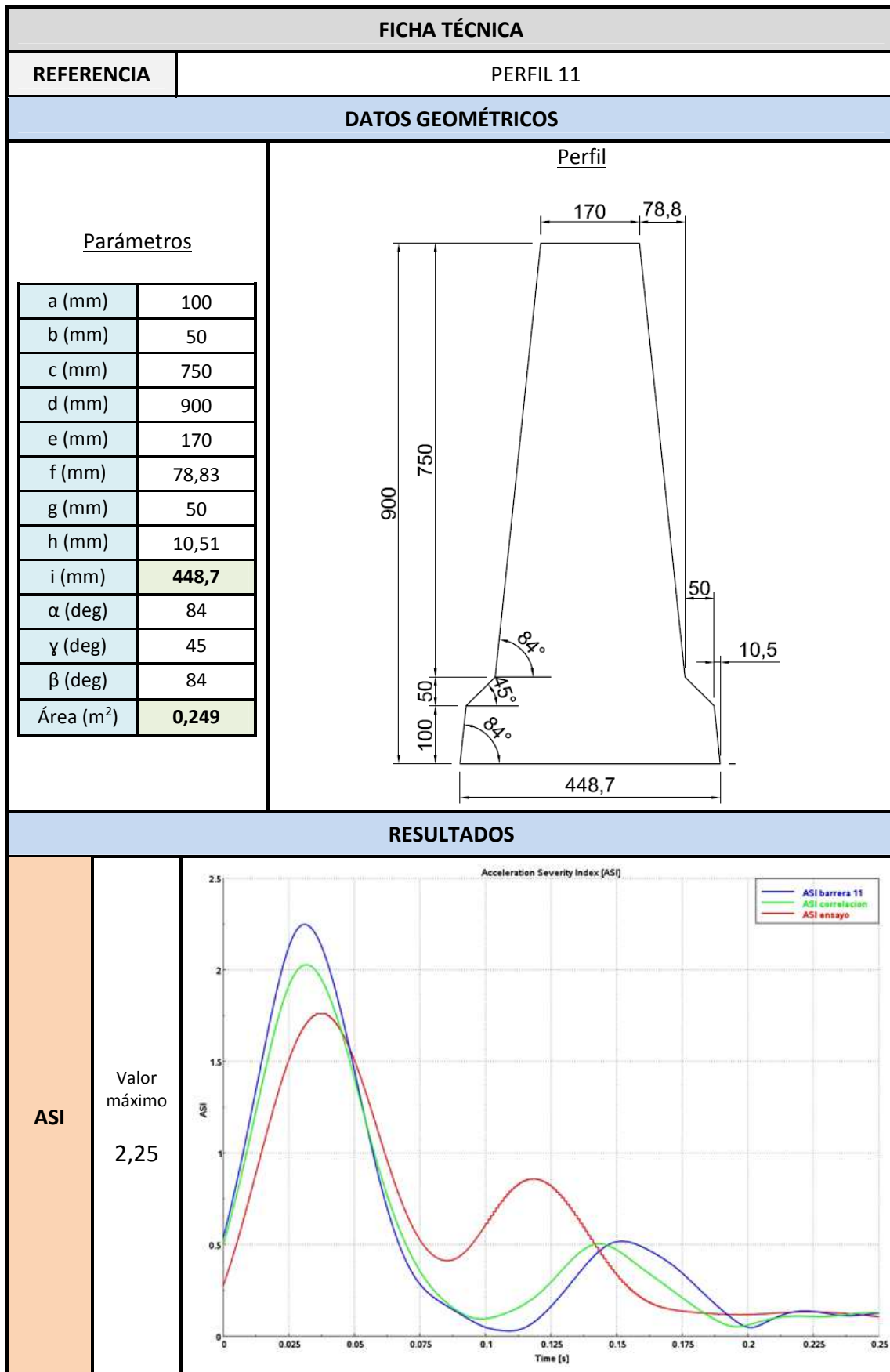




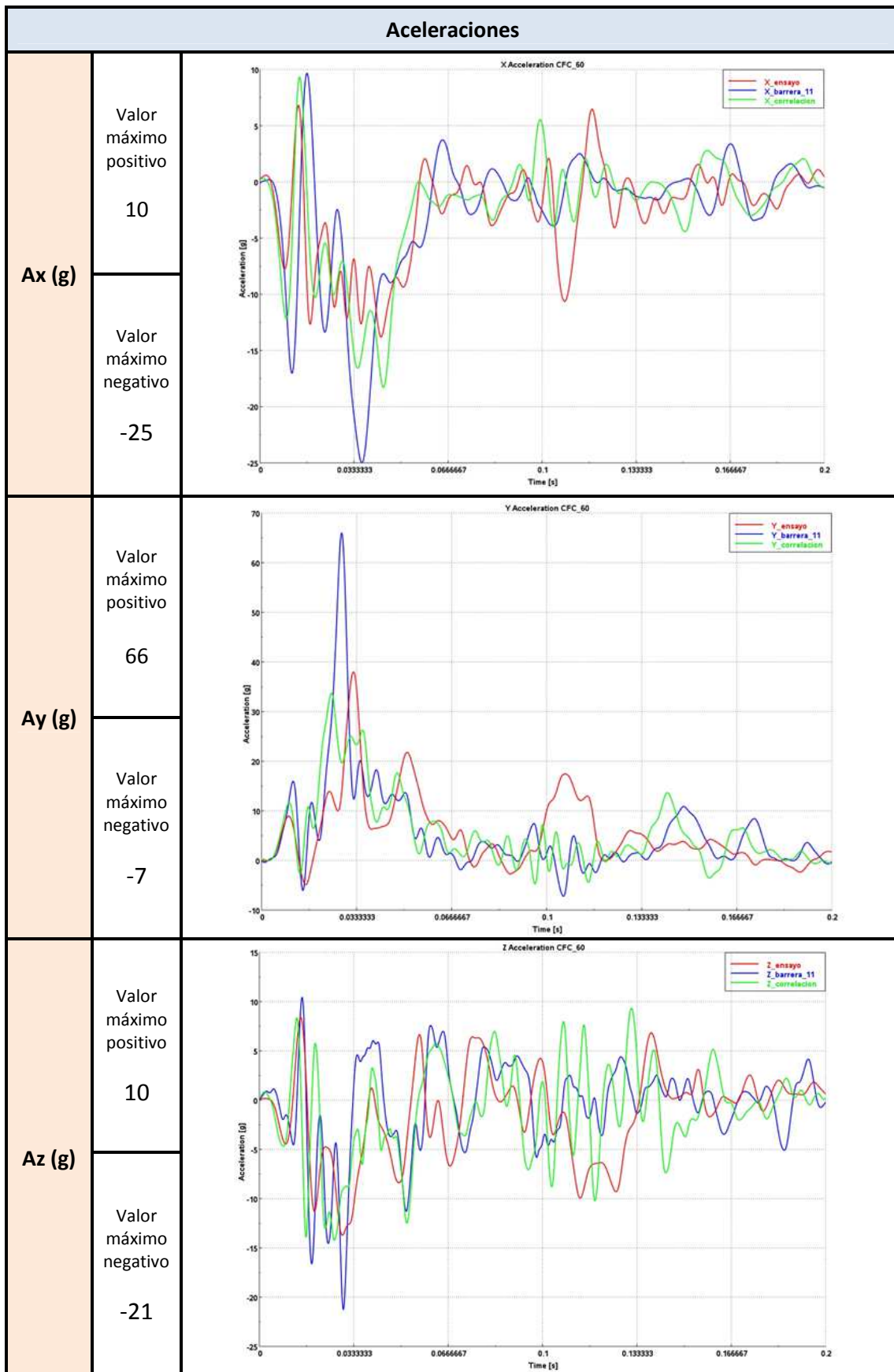
<b>Aceleraciones</b>			
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo	13	
	Valor máximo negativo	-23	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo	46	
	Valor máximo negativo	-4	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo	8	
	Valor máximo negativo	-23	

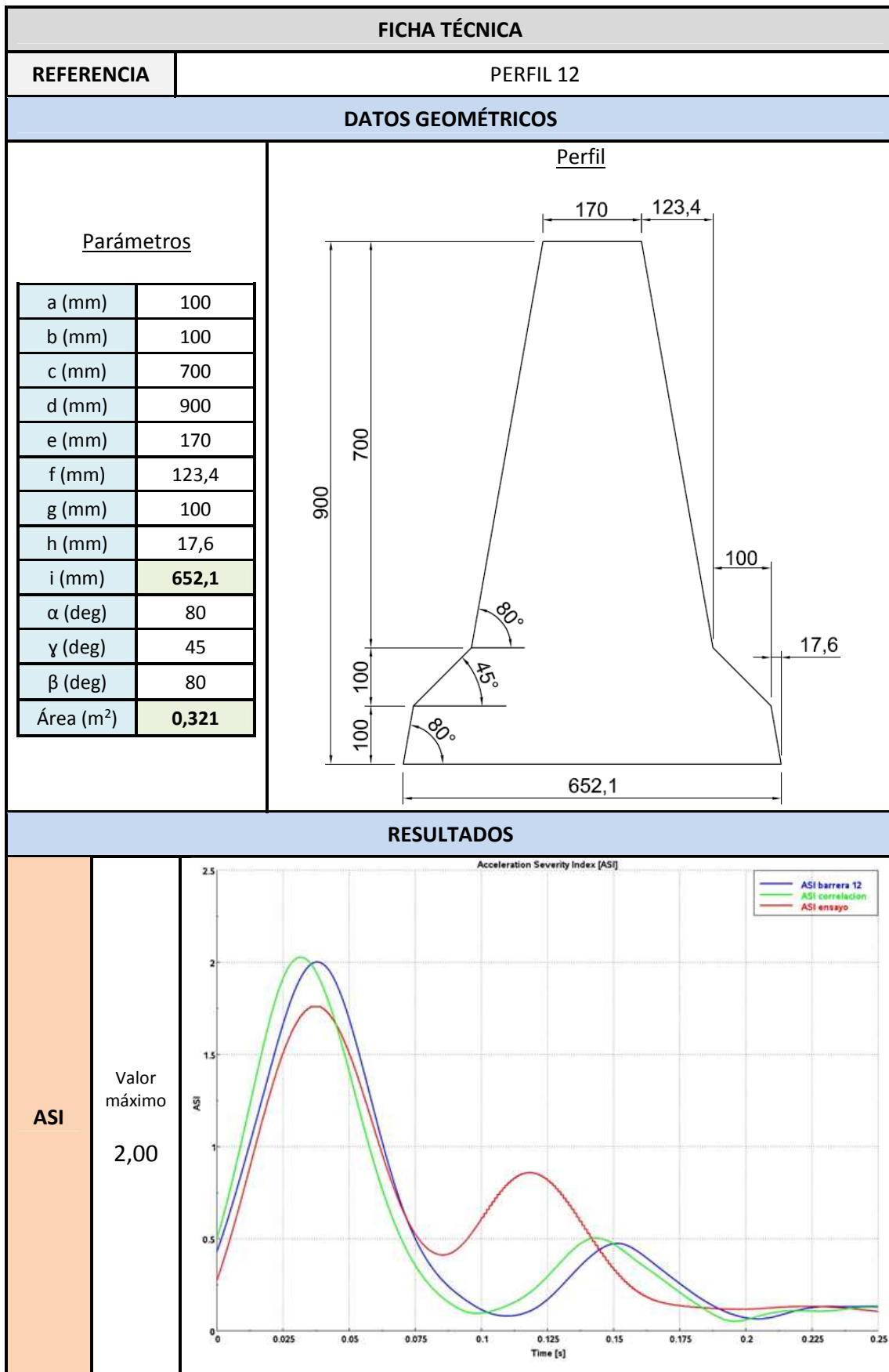


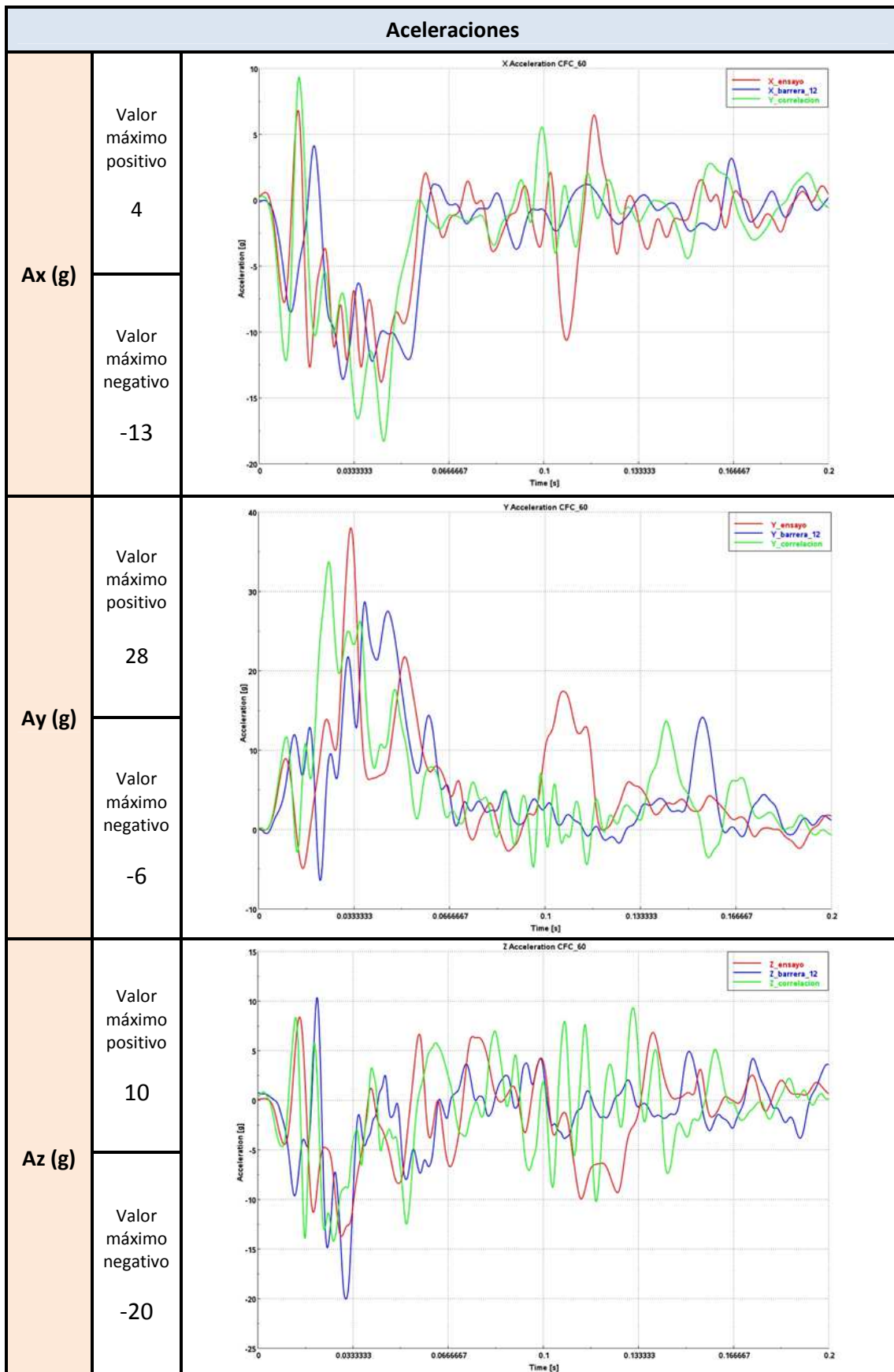
<b>Aceleraciones</b>			
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo	7,5	
	Valor máximo negativo	-33	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo	71	
	Valor máximo negativo	-5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo	16	
	Valor máximo negativo	-21	

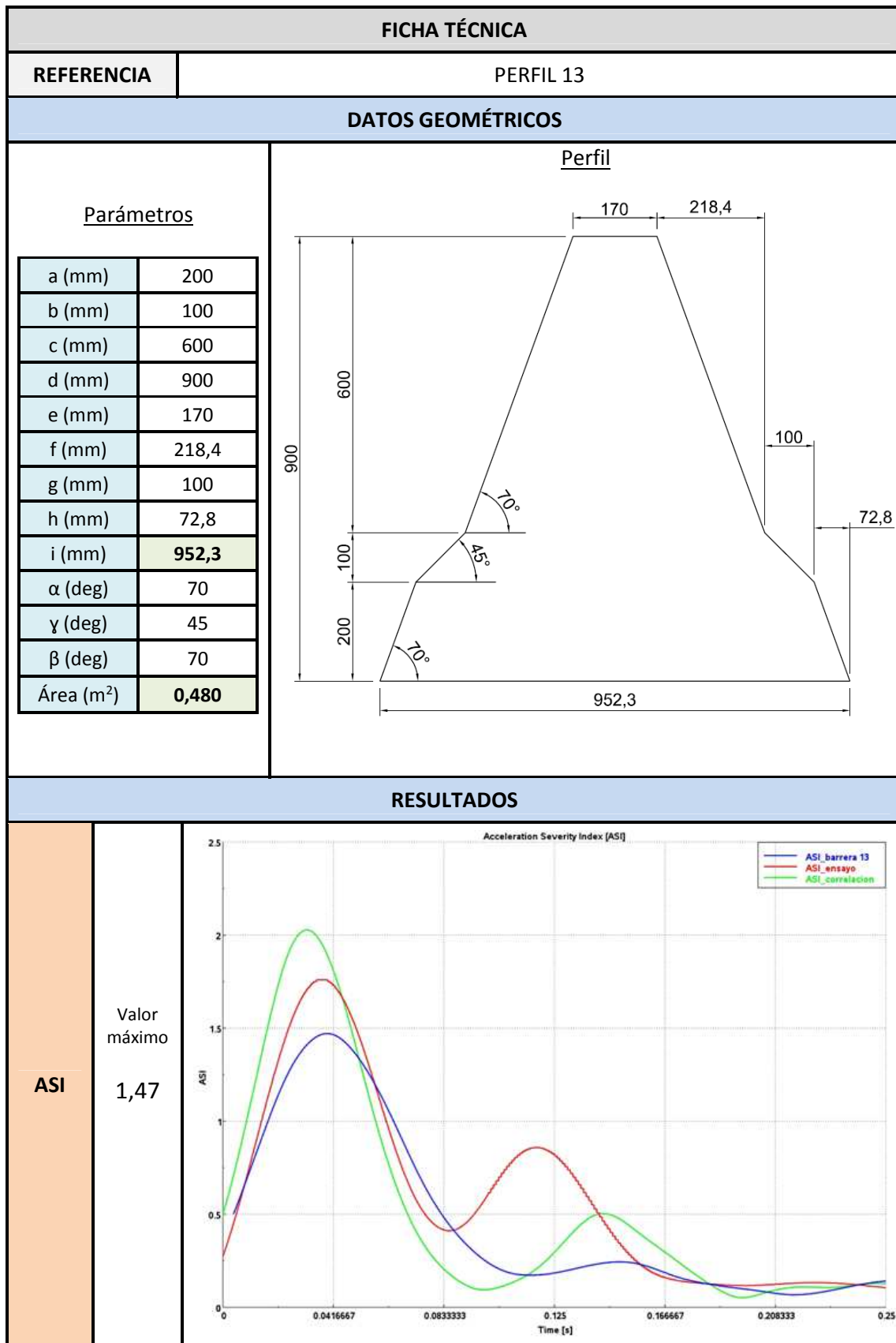




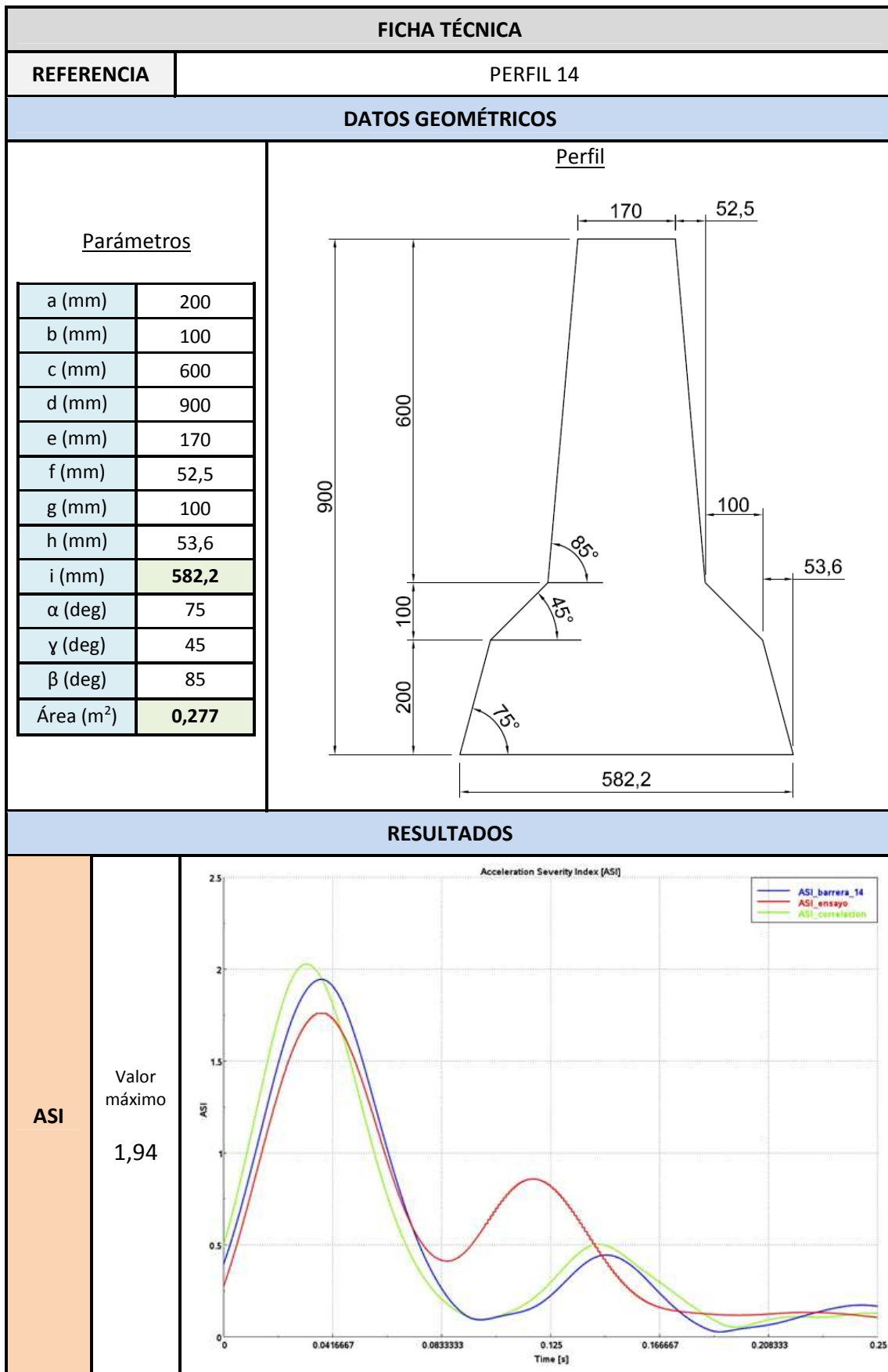




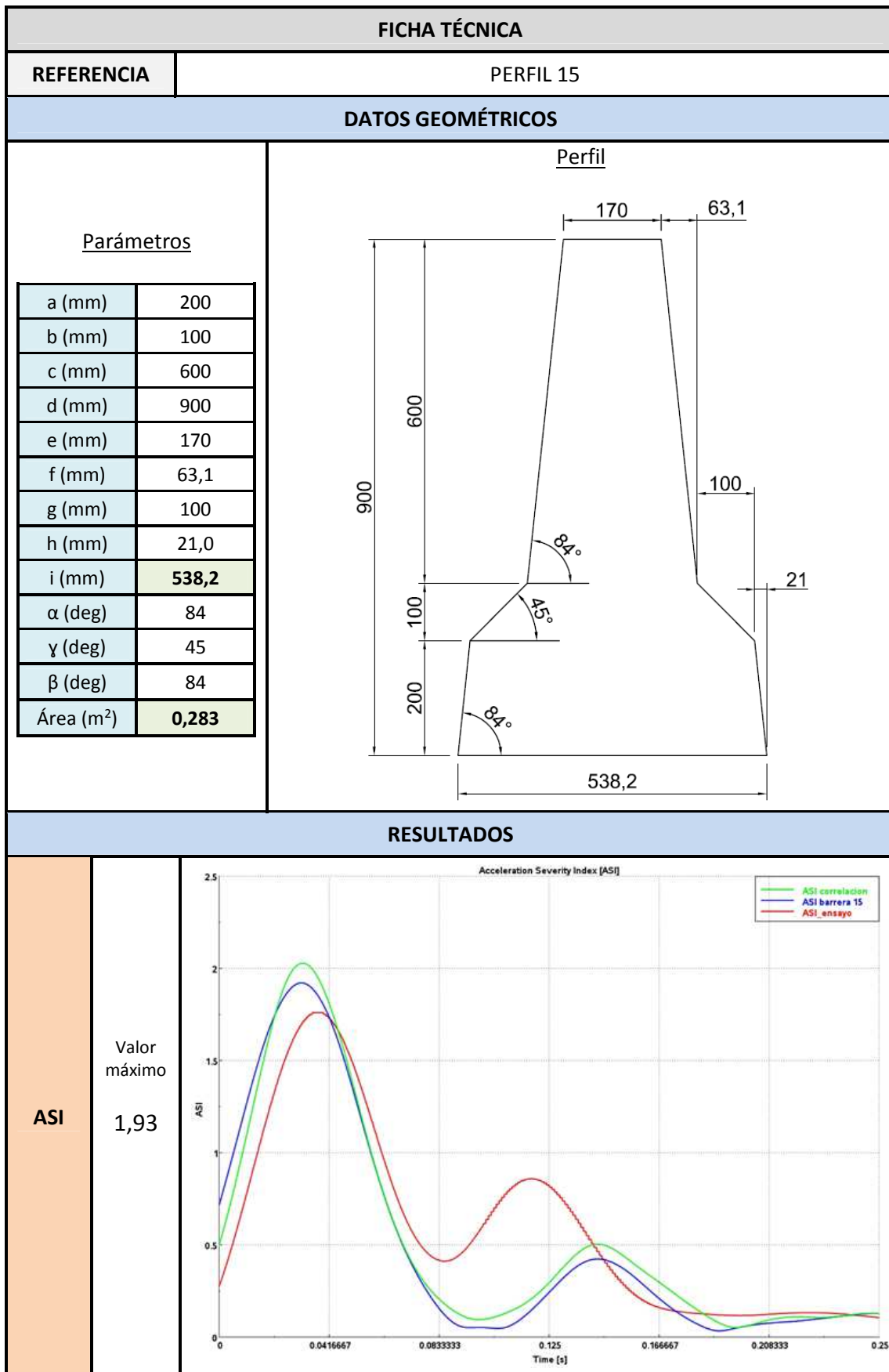




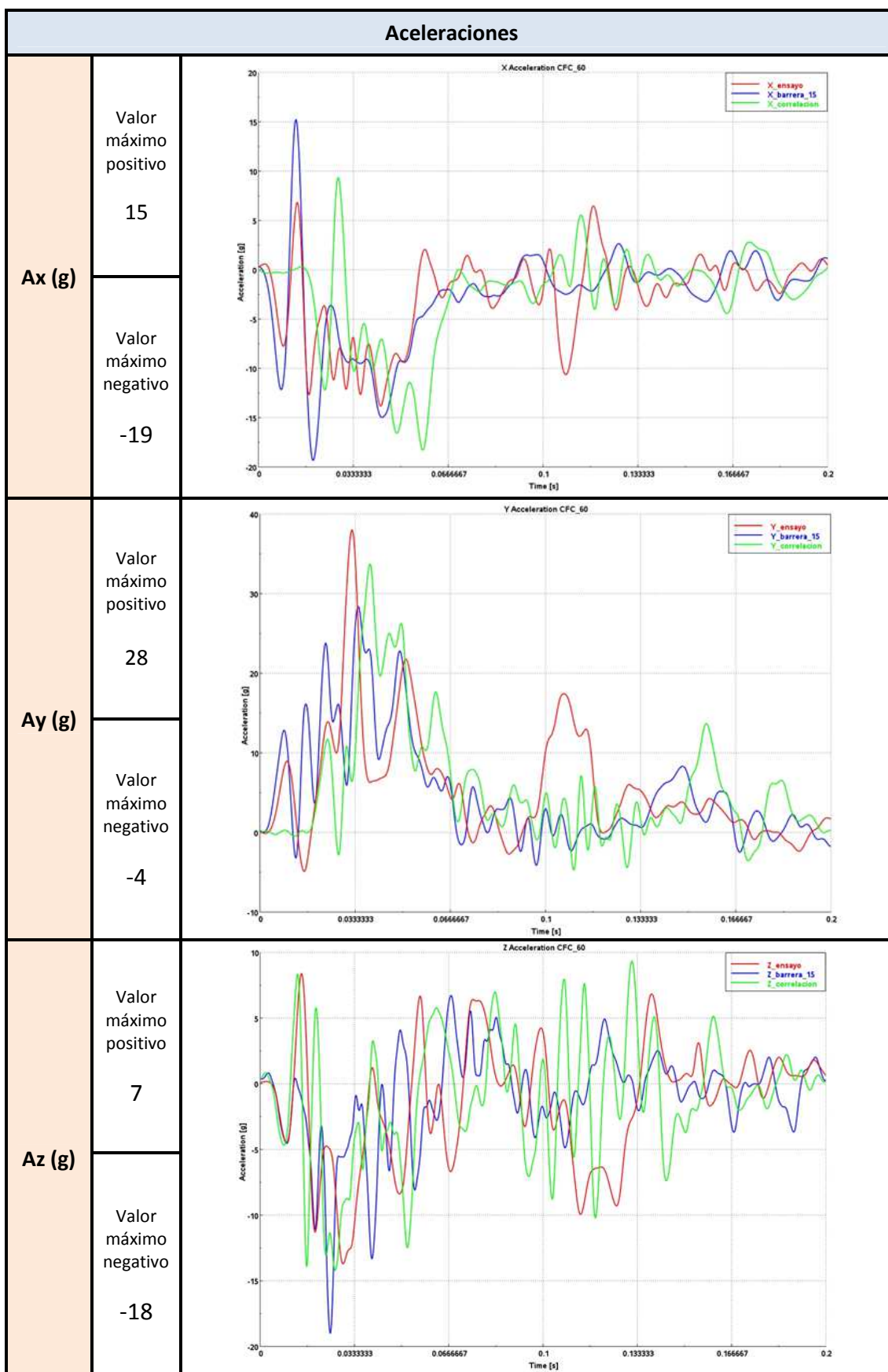
Aceleraciones		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  16	
	Valor máximo negativo  -17	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  23	
	Valor máximo negativo  -5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  8	
	Valor máximo negativo  -21	

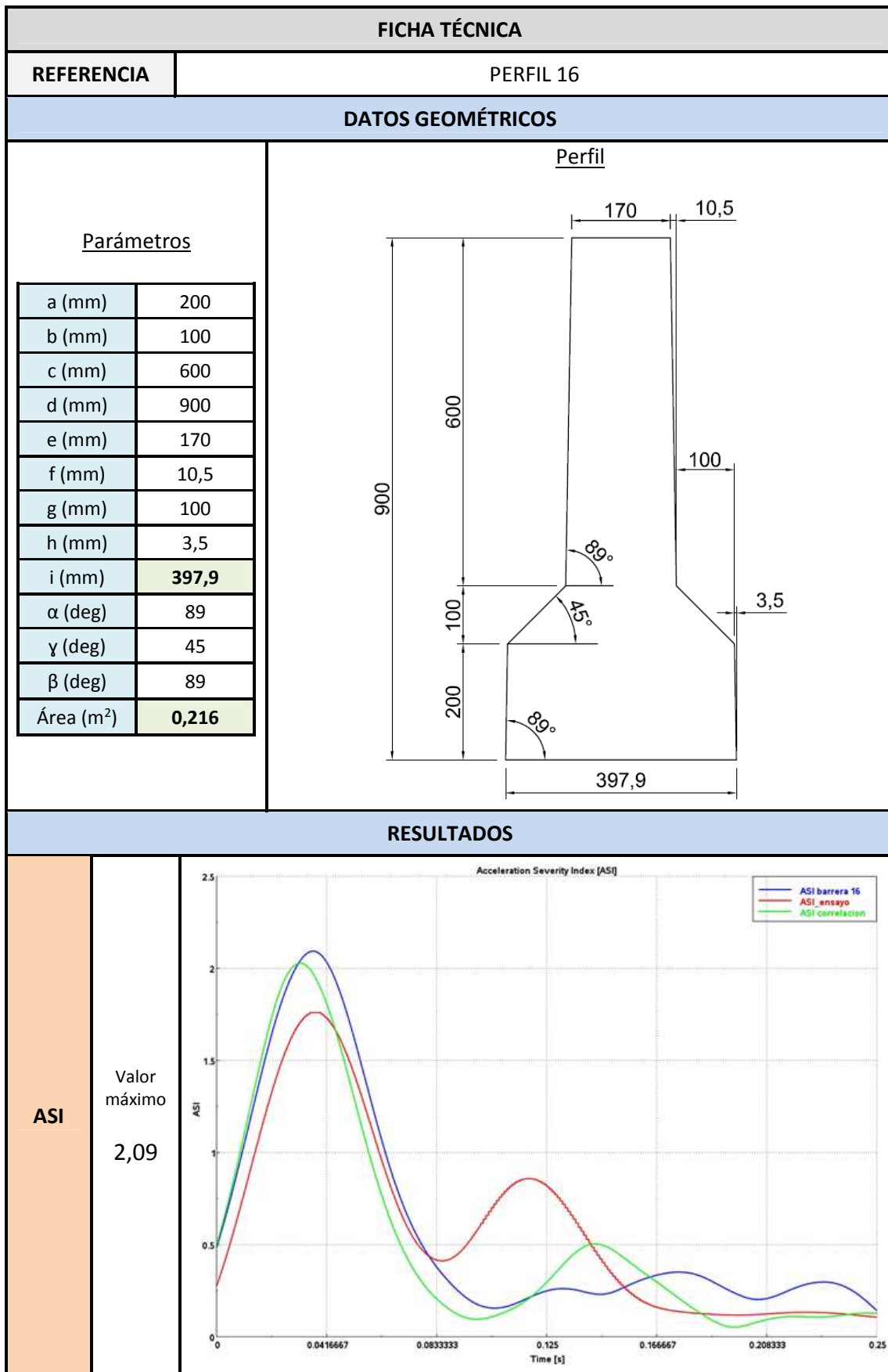


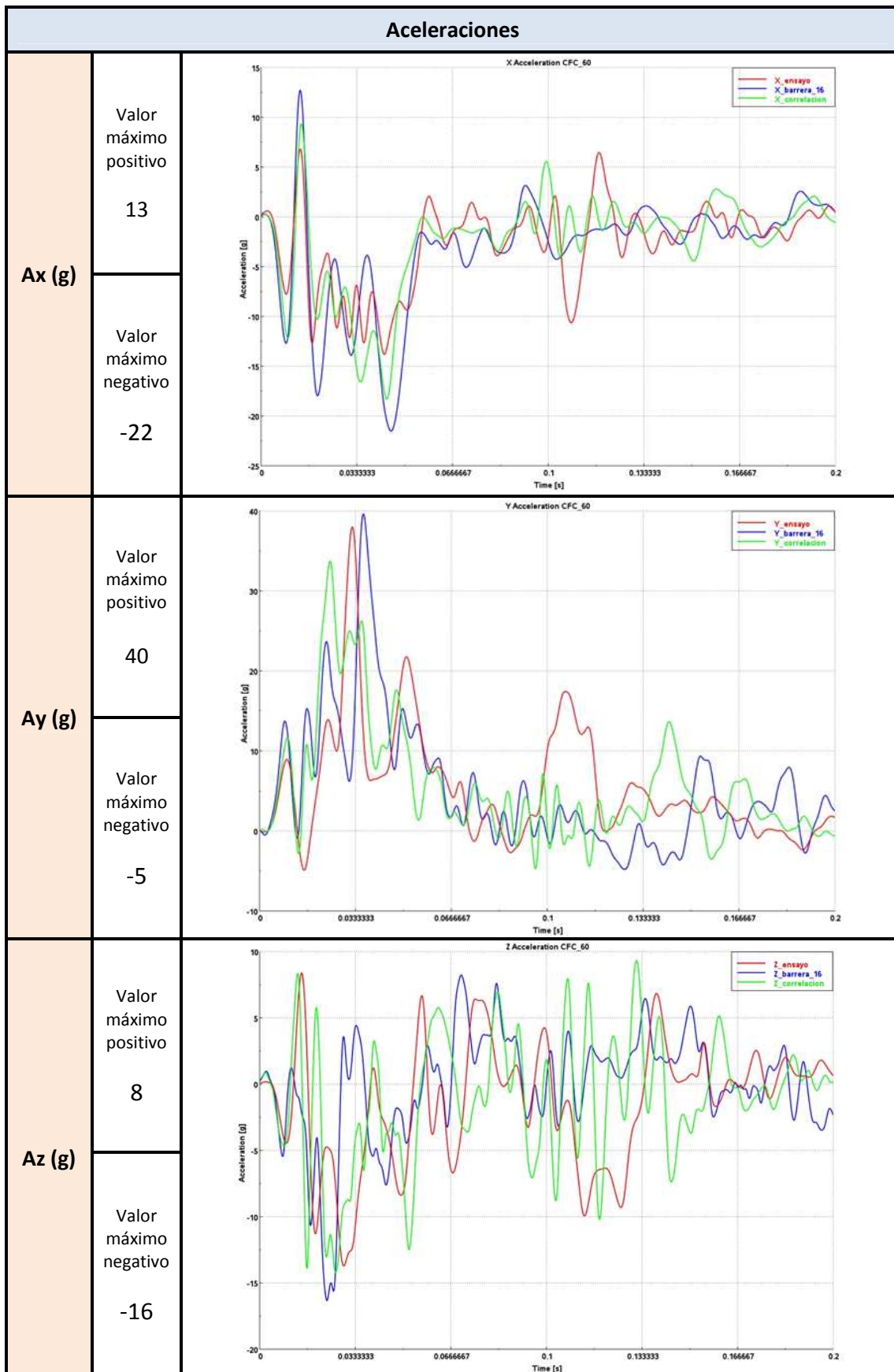
<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  15	
	Valor máximo negativo  -18	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  31	
	Valor máximo negativo  -5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  6	
	Valor máximo negativo  -16	

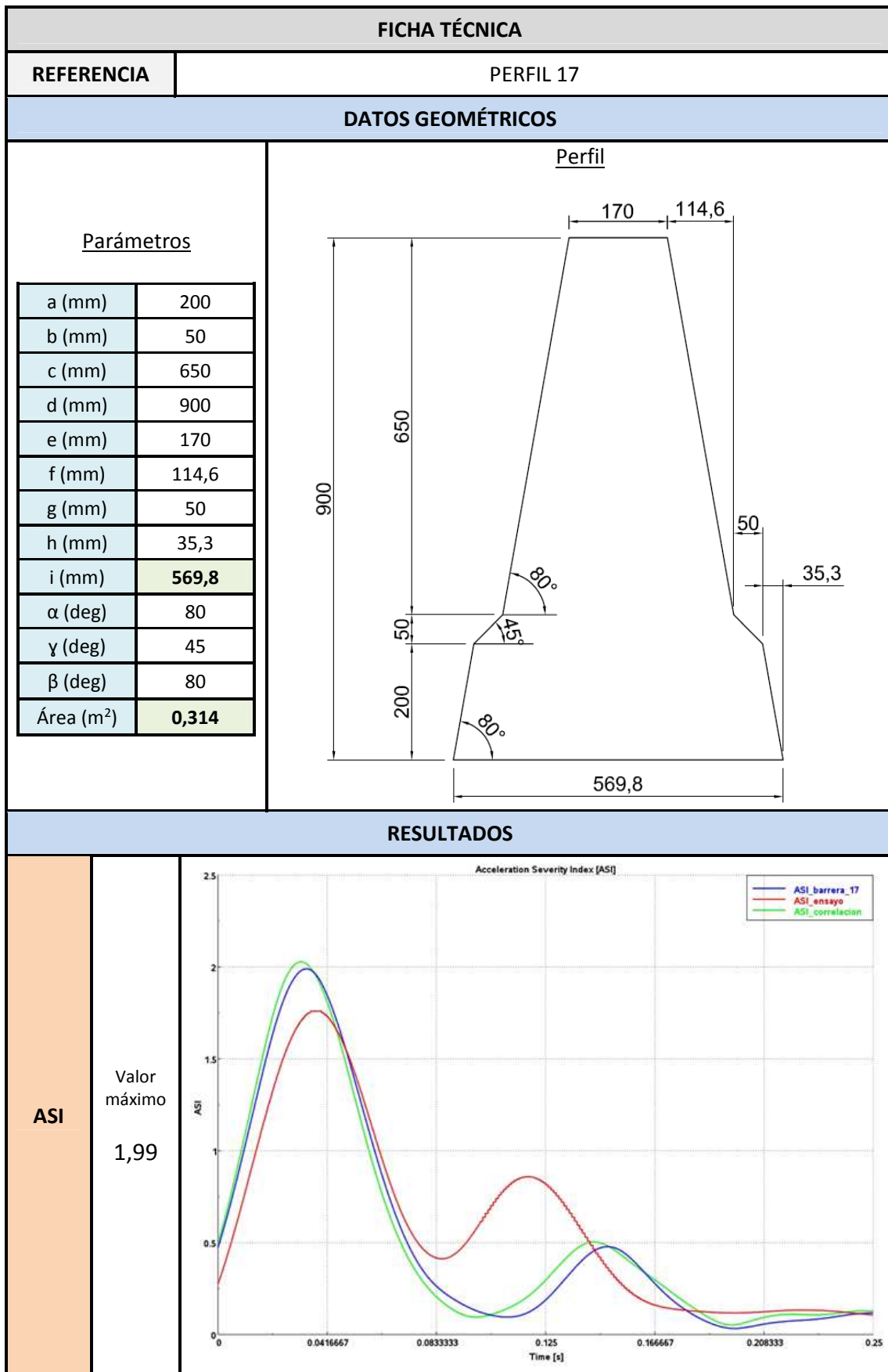


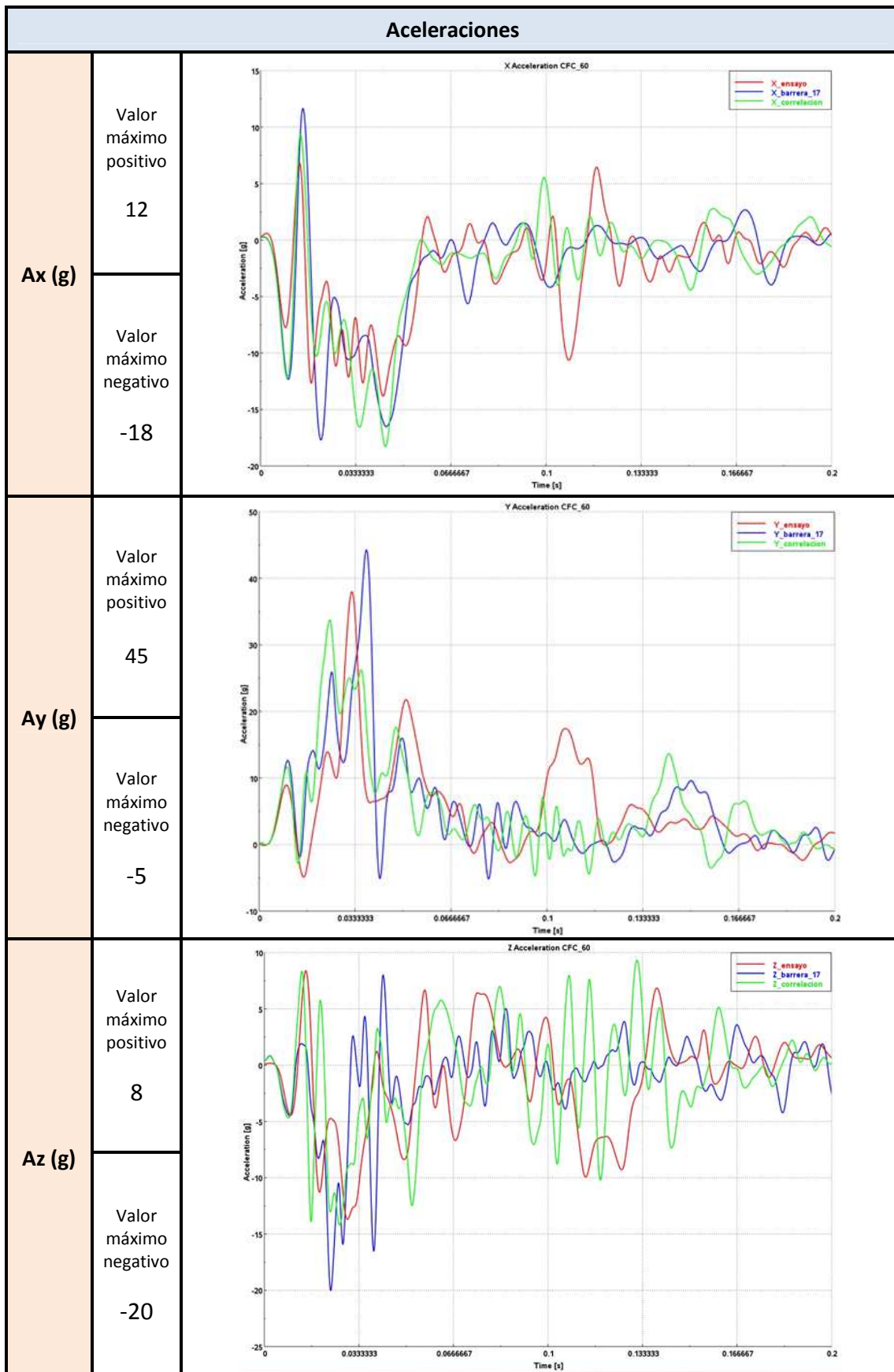




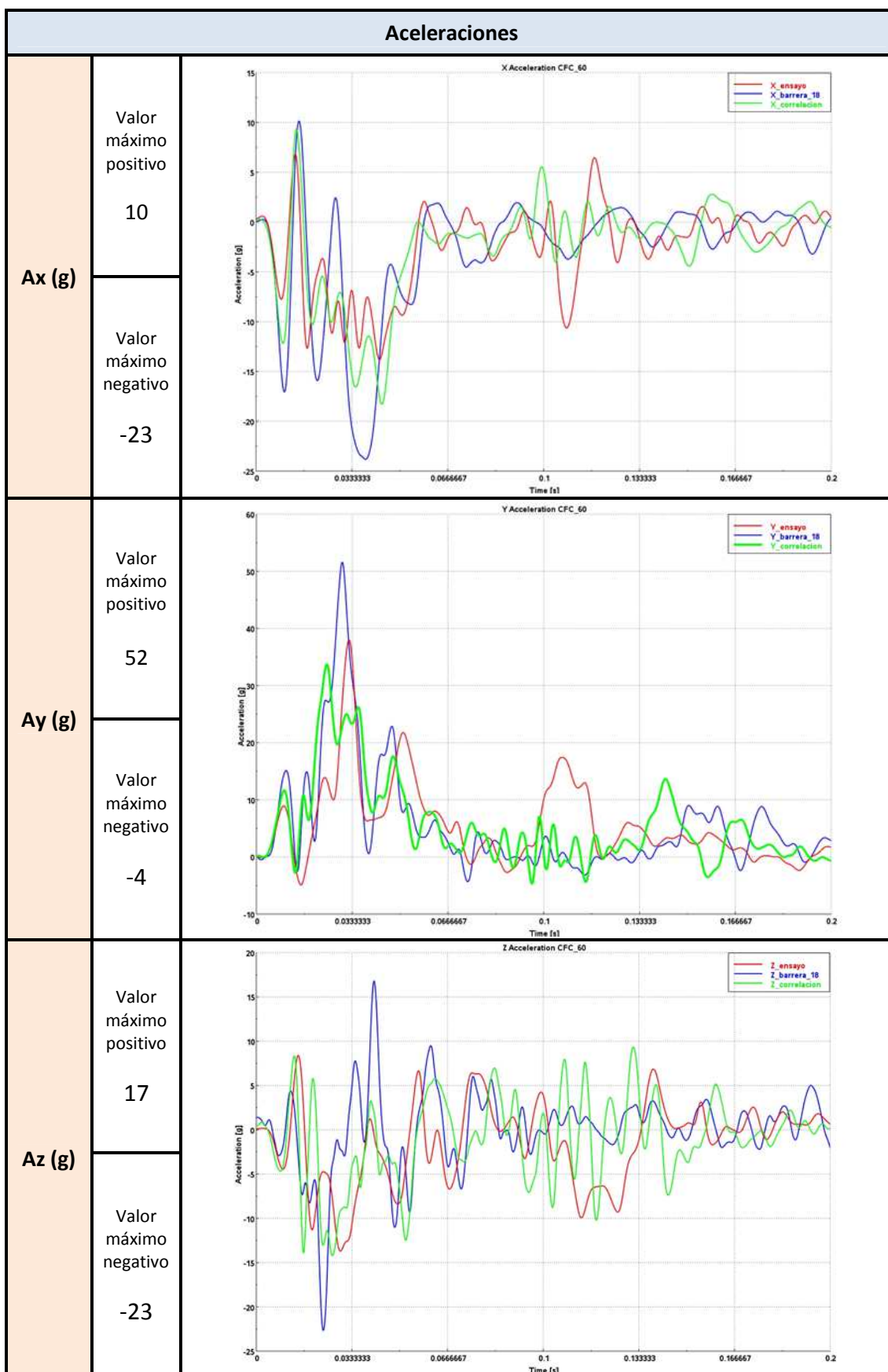


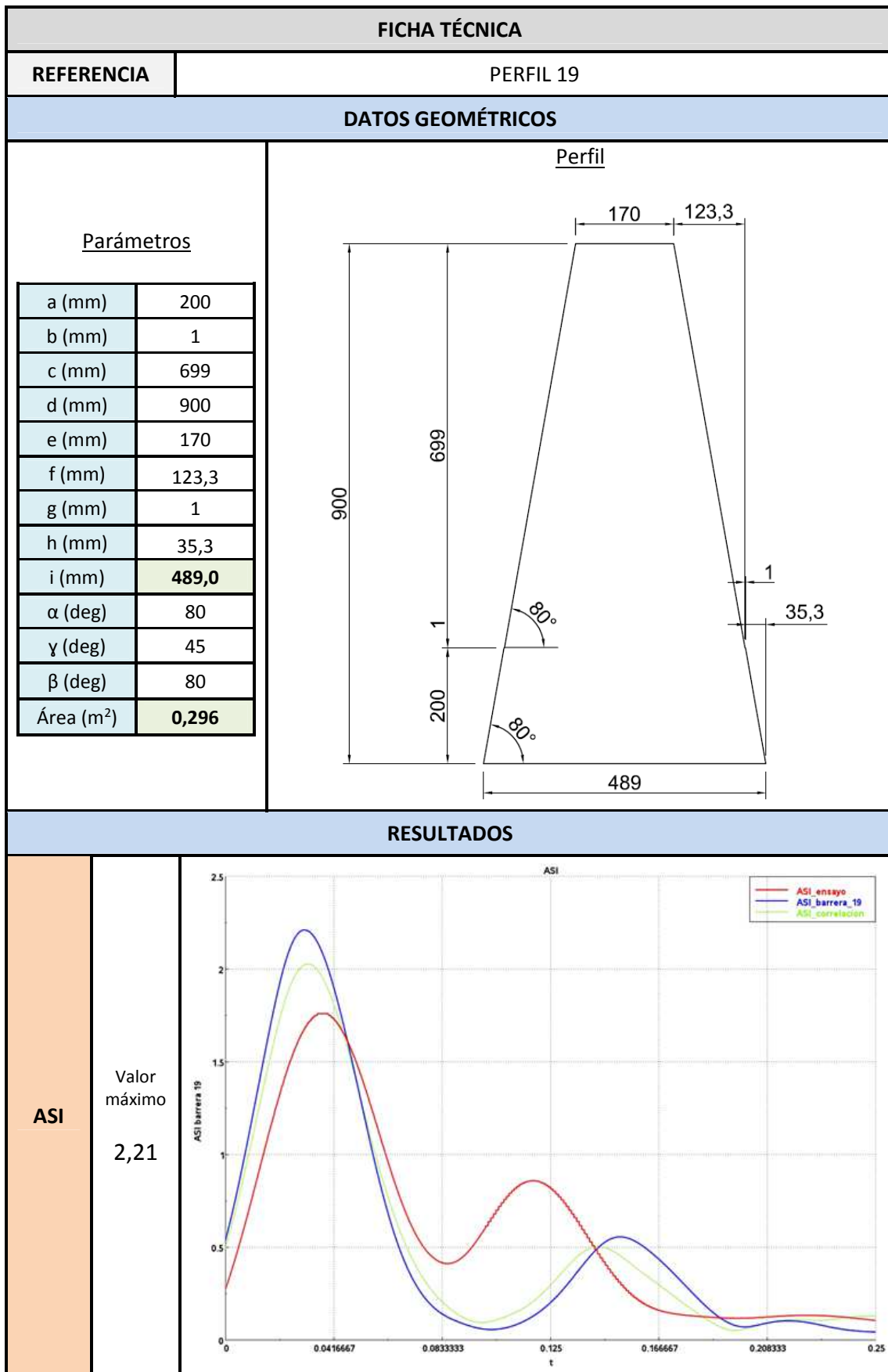






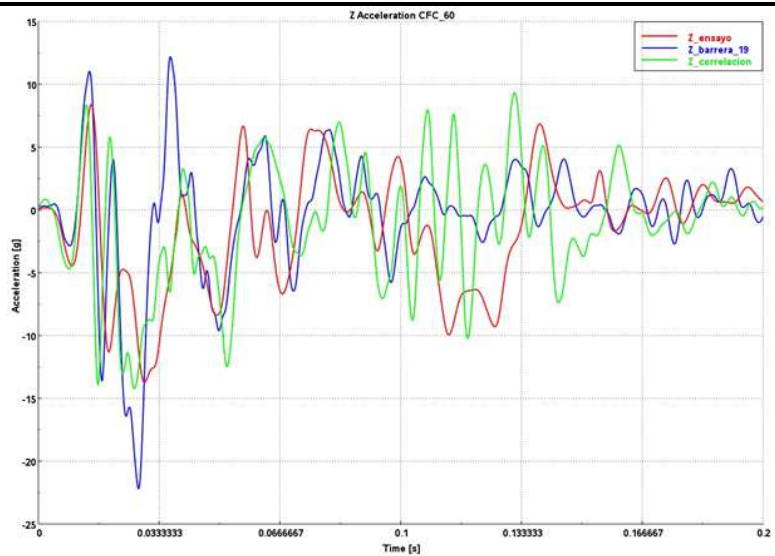
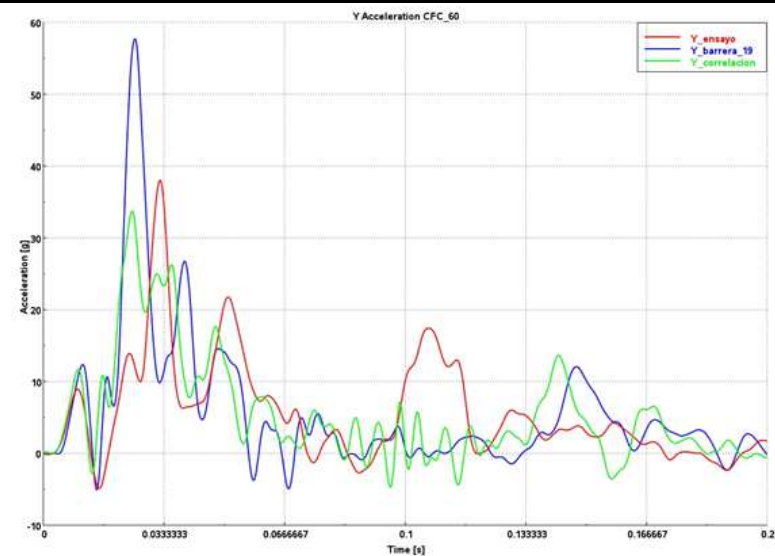
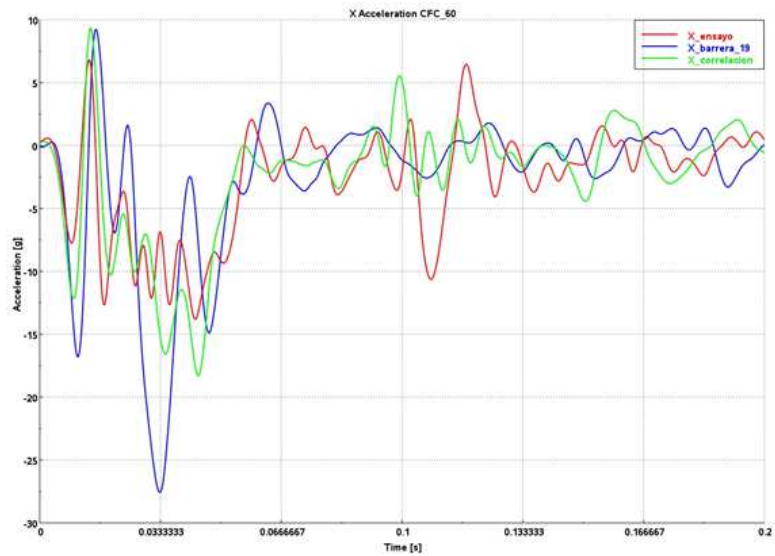
FICHA TÉCNICA																											
REFERENCIA	PERFIL 18																										
DATOS GEOMÉTRICOS																											
Parámetros	Perfil																										
<table border="1"> <tr><td>a (mm)</td><td>200</td></tr> <tr><td>b (mm)</td><td>50</td></tr> <tr><td>c (mm)</td><td>650</td></tr> <tr><td>d (mm)</td><td>900</td></tr> <tr><td>e (mm)</td><td>170</td></tr> <tr><td>f (mm)</td><td>11,3</td></tr> <tr><td>g (mm)</td><td>50</td></tr> <tr><td>h (mm)</td><td>3,5</td></tr> <tr><td>i (mm)</td><td><b>299,7</b></td></tr> <tr><td><math>\alpha</math> (deg)</td><td>89</td></tr> <tr><td><math>\gamma</math> (deg)</td><td>45</td></tr> <tr><td><math>\beta</math> (deg)</td><td>89</td></tr> <tr><td>Área (m<sup>2</sup>)</td><td><b>0,189</b></td></tr> </table>	a (mm)	200	b (mm)	50	c (mm)	650	d (mm)	900	e (mm)	170	f (mm)	11,3	g (mm)	50	h (mm)	3,5	i (mm)	<b>299,7</b>	$\alpha$ (deg)	89	$\gamma$ (deg)	45	$\beta$ (deg)	89	Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,189</b>	
a (mm)	200																										
b (mm)	50																										
c (mm)	650																										
d (mm)	900																										
e (mm)	170																										
f (mm)	11,3																										
g (mm)	50																										
h (mm)	3,5																										
i (mm)	<b>299,7</b>																										
$\alpha$ (deg)	89																										
$\gamma$ (deg)	45																										
$\beta$ (deg)	89																										
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,189</b>																										
RESULTADOS																											
ASI	<table border="1"> <tr> <td>Valor máximo</td> <td>2,31</td> </tr> </table>	Valor máximo	2,31																								
Valor máximo	2,31																										

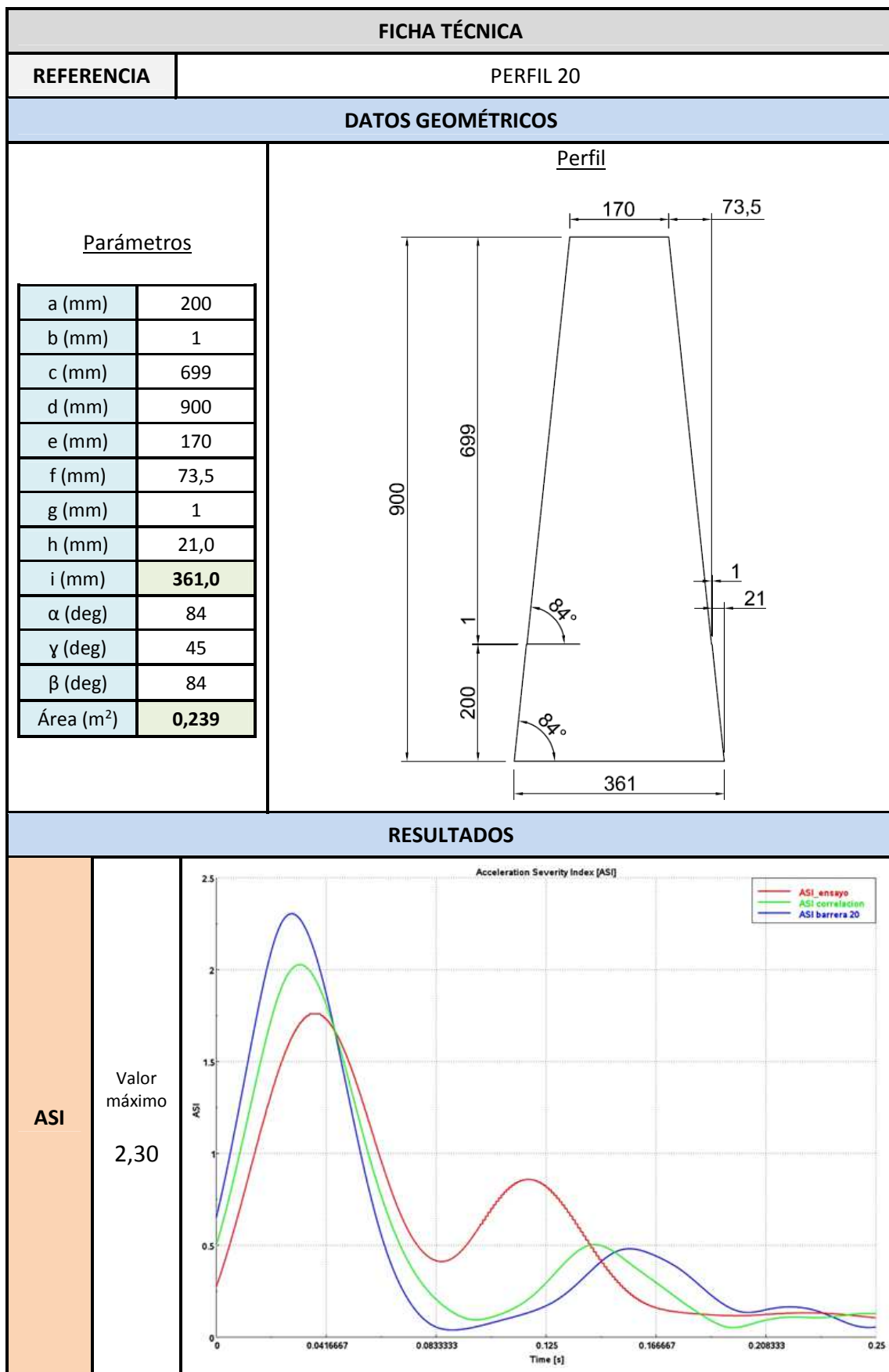


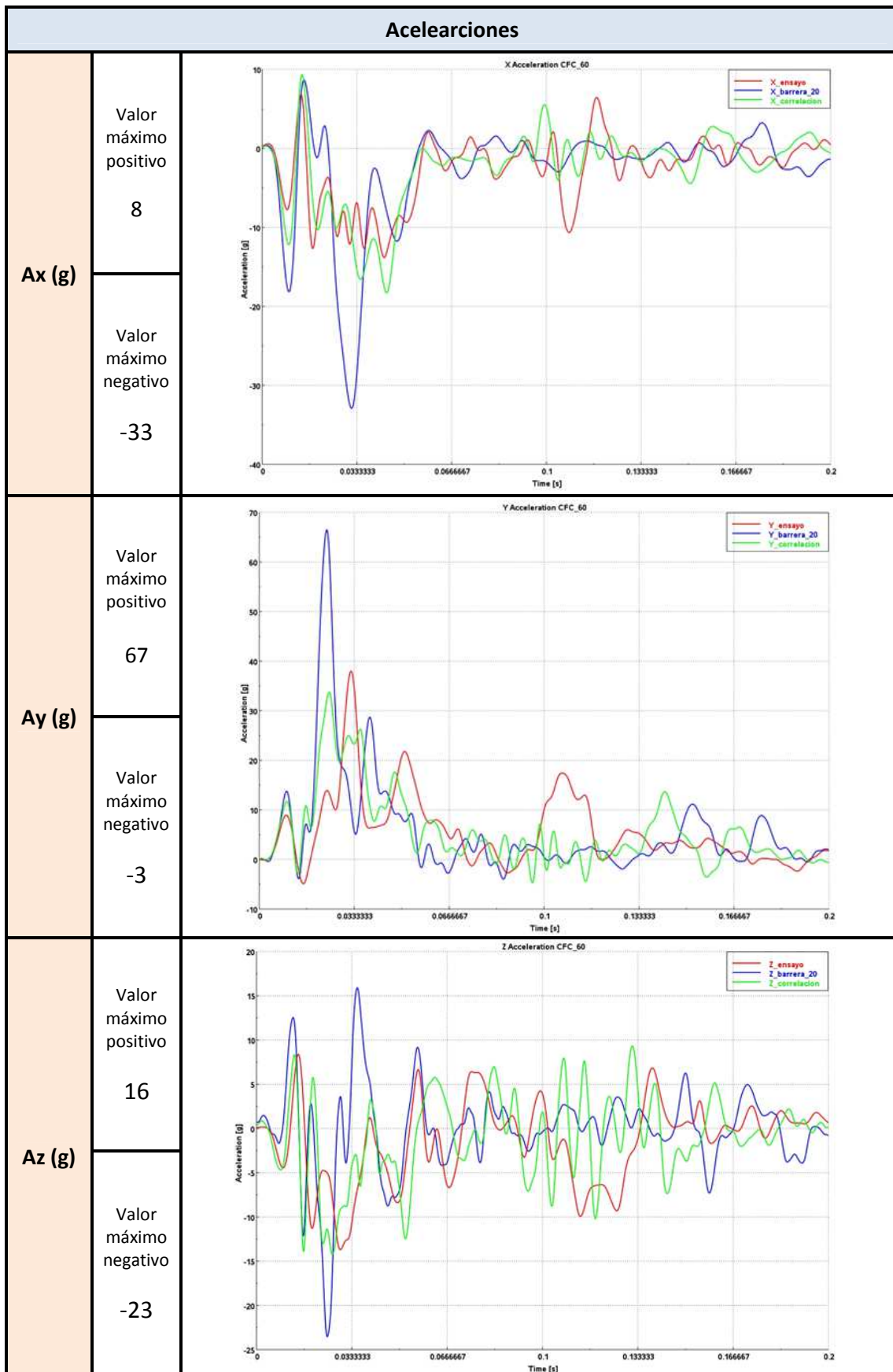




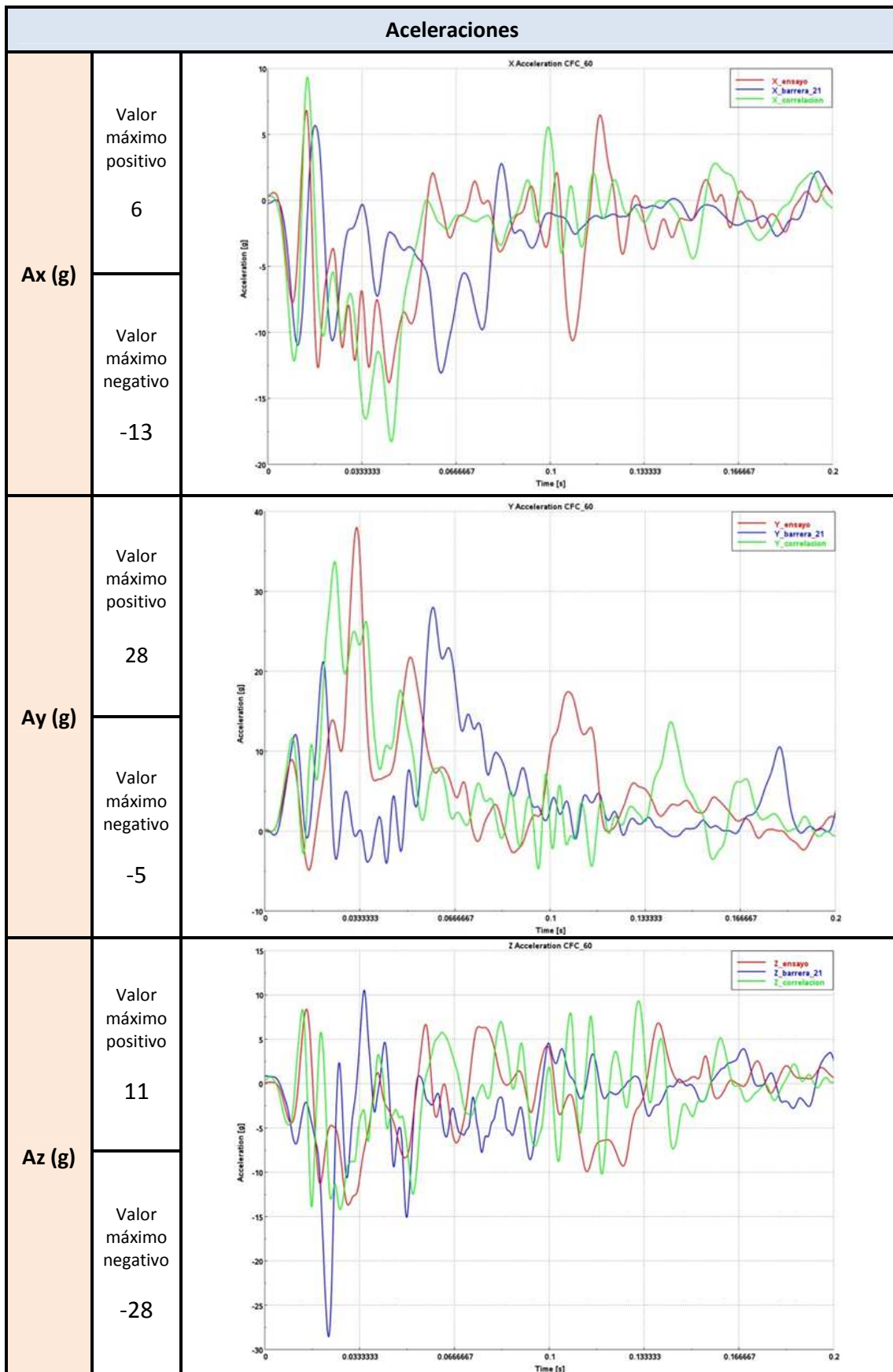
<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo	9
	Valor máximo negativo	-27
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo	58
	Valor máximo negativo	-5
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo	12
	Valor máximo negativo	-22

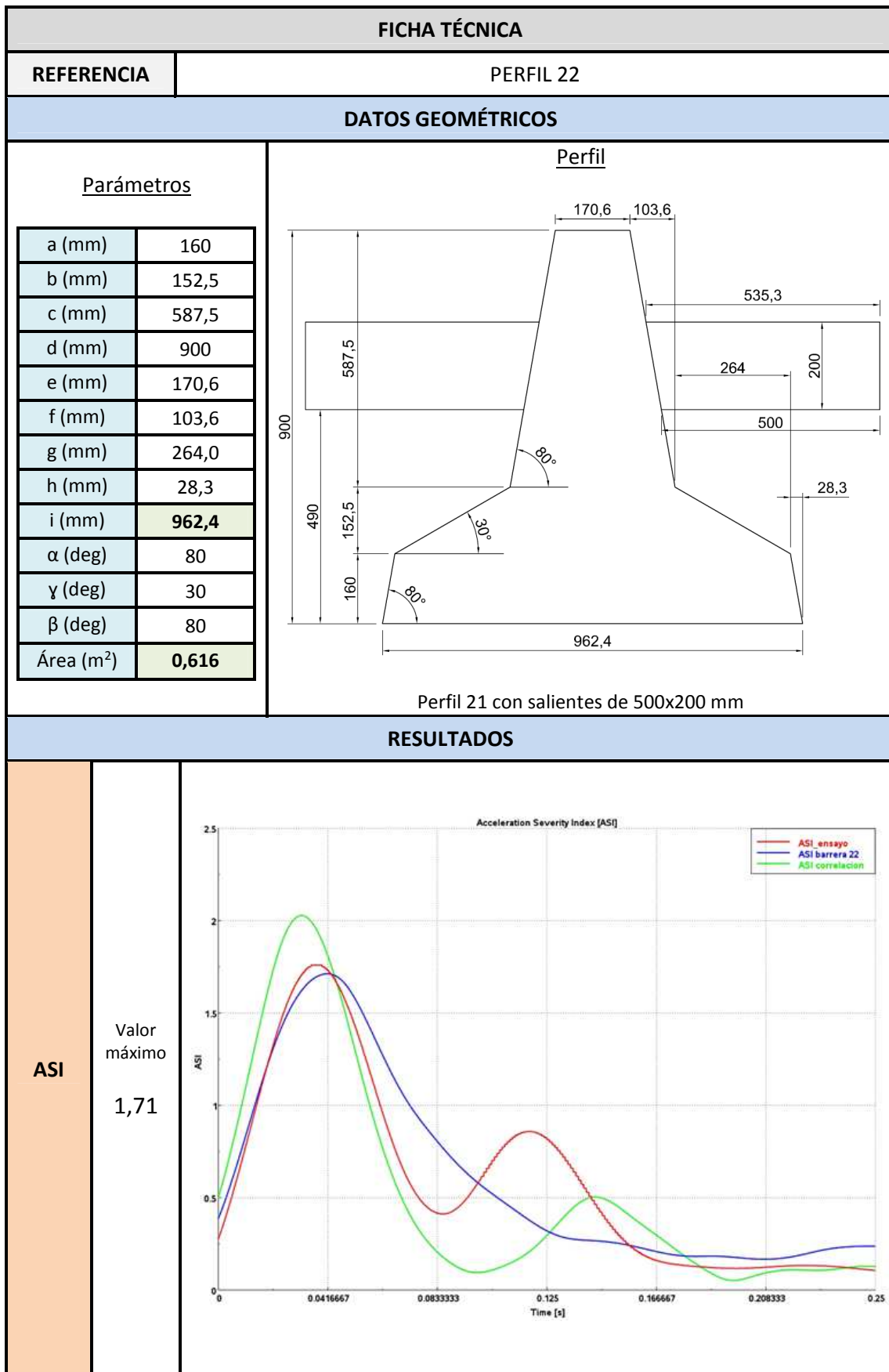


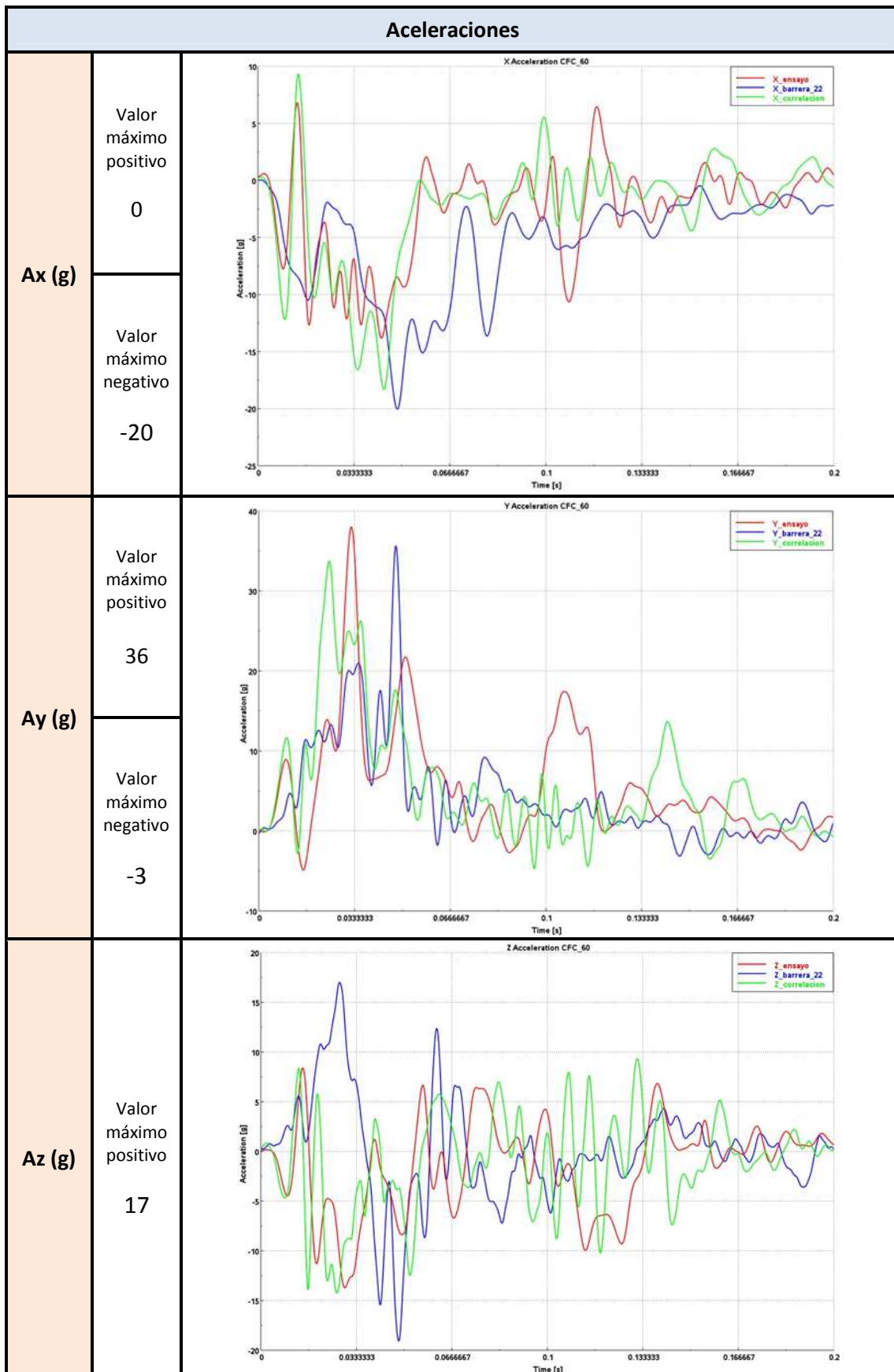


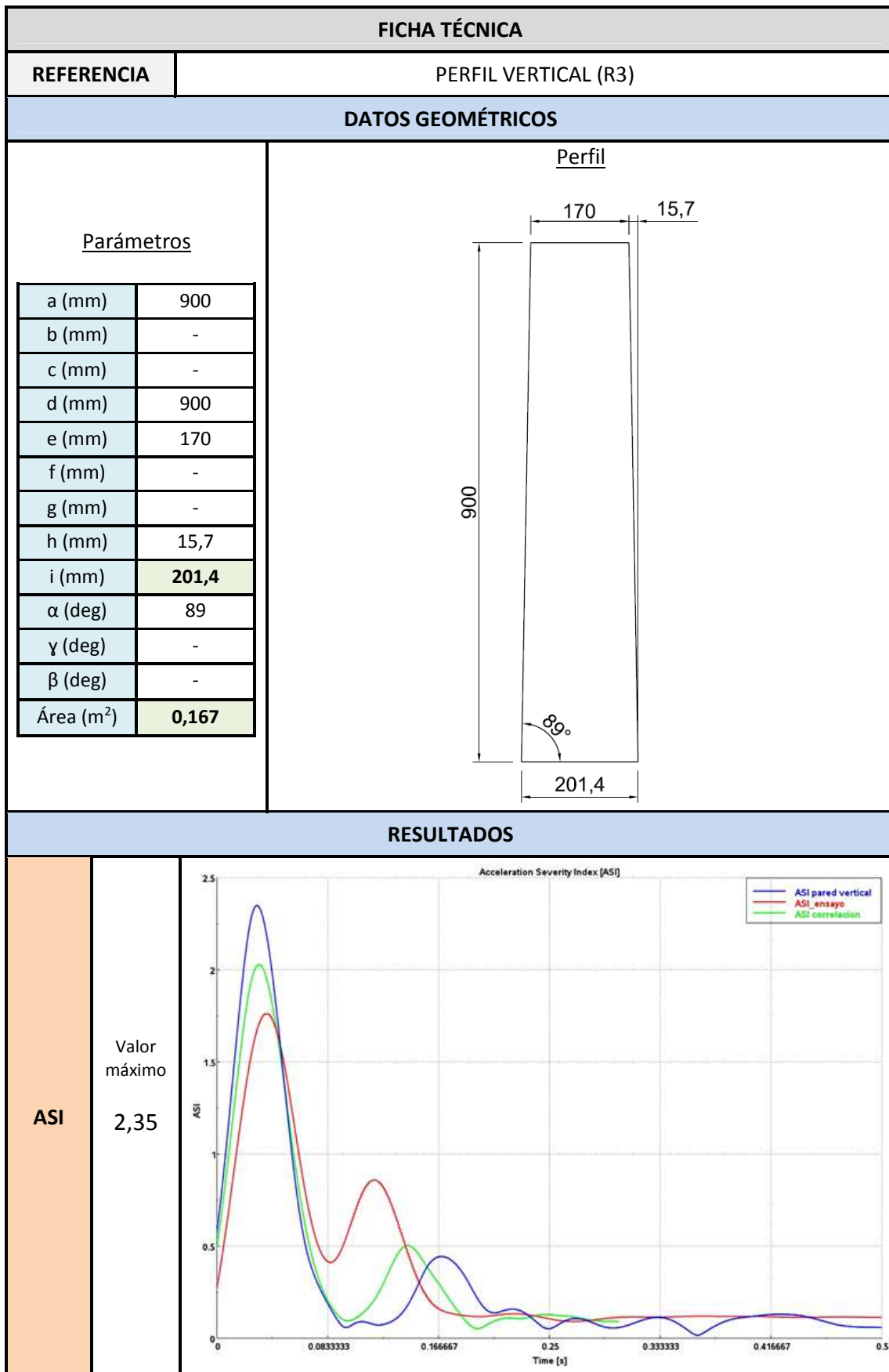


FICHA TÉCNICA																												
REFERENCIA	PERFIL 21																											
DATOS GEOMÉTRICOS																												
<p>Parámetros</p> <table border="1"> <tr><td>a (mm)</td><td>160</td></tr> <tr><td>b (mm)</td><td>152,5</td></tr> <tr><td>c (mm)</td><td>587,5</td></tr> <tr><td>d (mm)</td><td>900</td></tr> <tr><td>e (mm)</td><td>170,6</td></tr> <tr><td>f (mm)</td><td>103,6</td></tr> <tr><td>g (mm)</td><td>264,0</td></tr> <tr><td>h (mm)</td><td>28,3</td></tr> <tr><td>i (mm)</td><td><b>962,4</b></td></tr> <tr><td><math>\alpha</math> (deg)</td><td>80</td></tr> <tr><td><math>\gamma</math> (deg)</td><td>30</td></tr> <tr><td><math>\beta</math> (deg)</td><td>80</td></tr> <tr><td>Área (m<sup>2</sup>)</td><td><b>0,409</b></td></tr> </table>		a (mm)	160	b (mm)	152,5	c (mm)	587,5	d (mm)	900	e (mm)	170,6	f (mm)	103,6	g (mm)	264,0	h (mm)	28,3	i (mm)	<b>962,4</b>	$\alpha$ (deg)	80	$\gamma$ (deg)	30	$\beta$ (deg)	80	Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,409</b>	<p>Perfil</p>
a (mm)	160																											
b (mm)	152,5																											
c (mm)	587,5																											
d (mm)	900																											
e (mm)	170,6																											
f (mm)	103,6																											
g (mm)	264,0																											
h (mm)	28,3																											
i (mm)	<b>962,4</b>																											
$\alpha$ (deg)	80																											
$\gamma$ (deg)	30																											
$\beta$ (deg)	80																											
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,409</b>																											
RESULTADOS																												
ASI	Valor máximo																											
	1,55																											





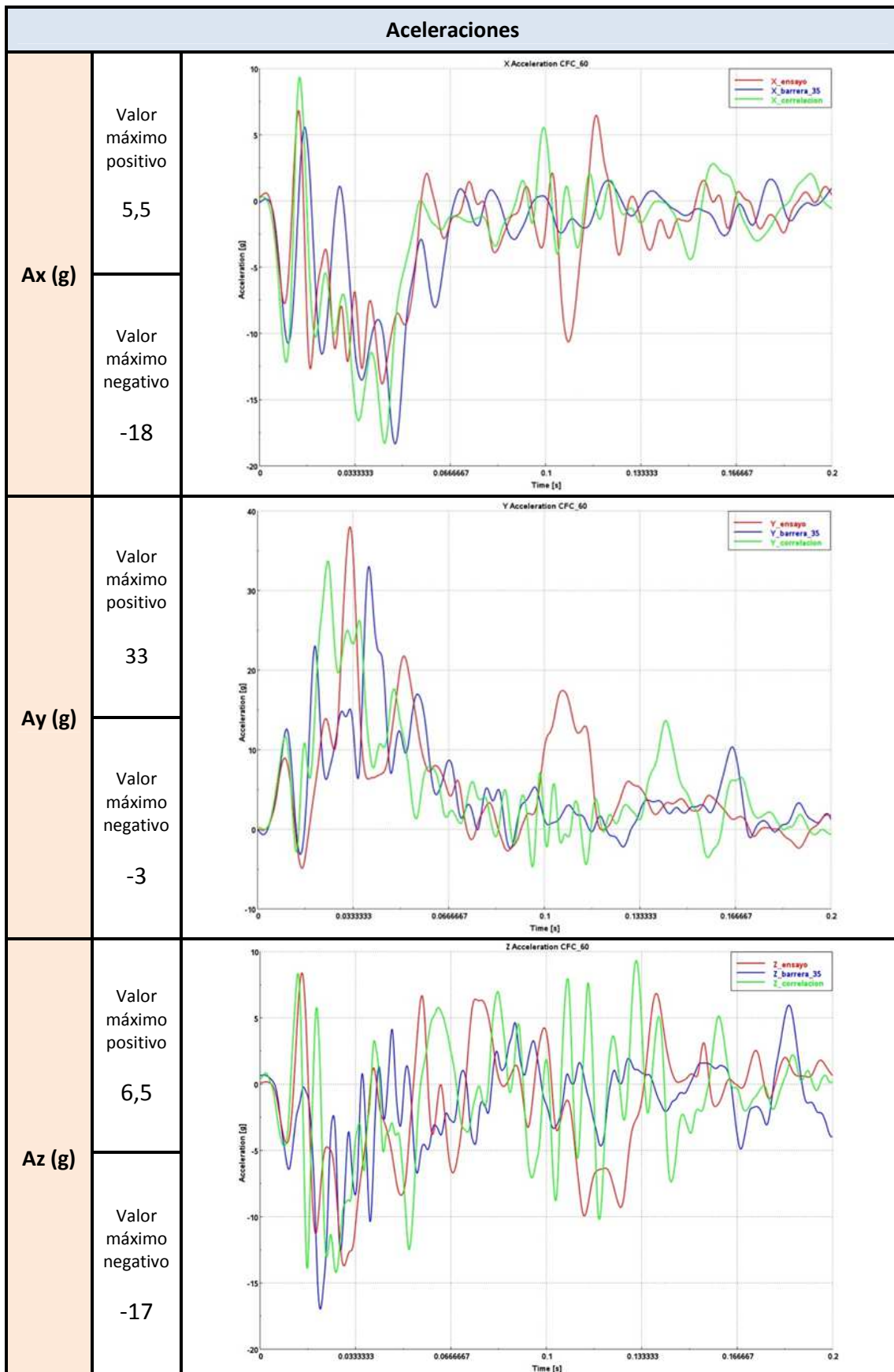


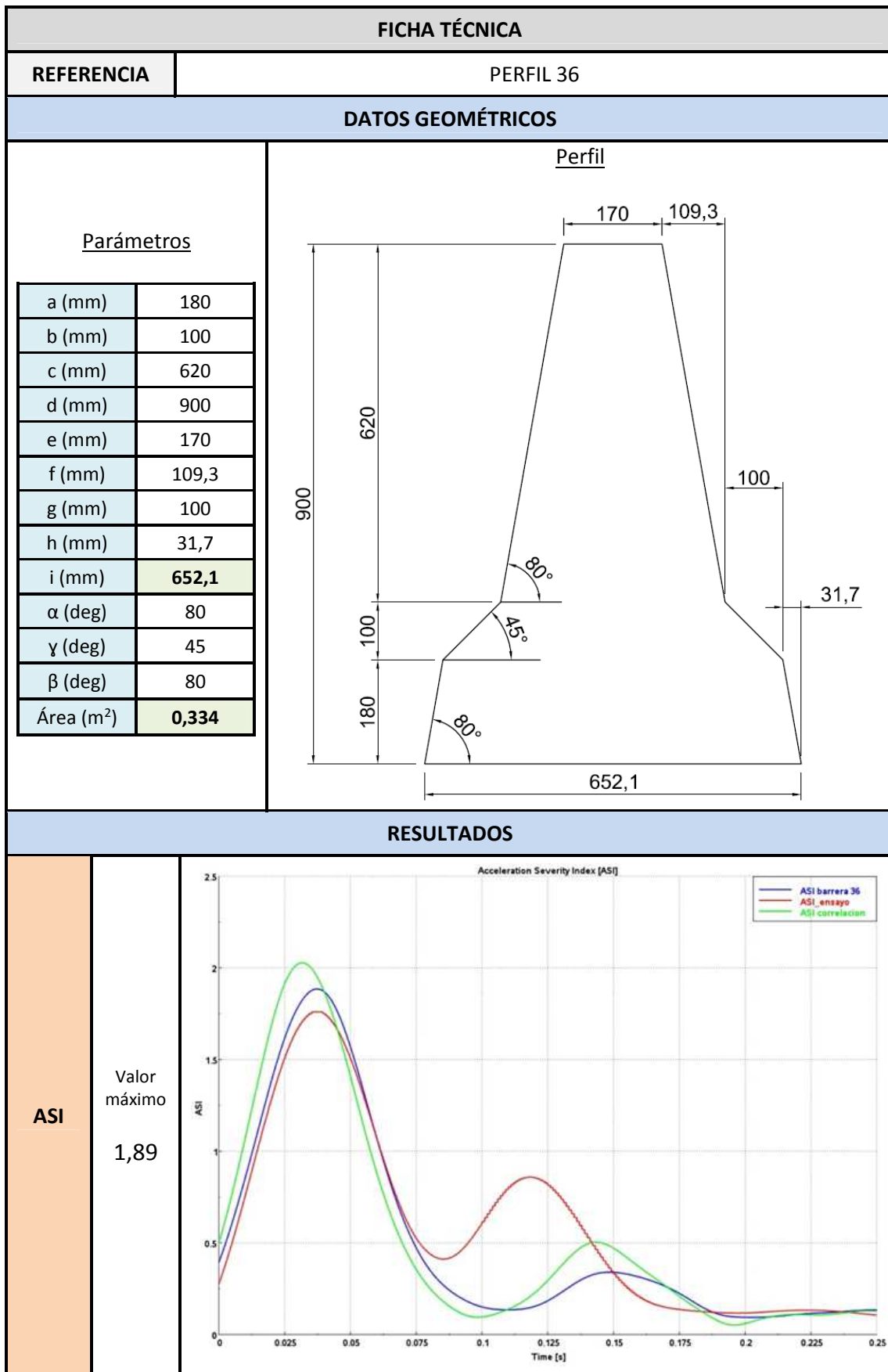




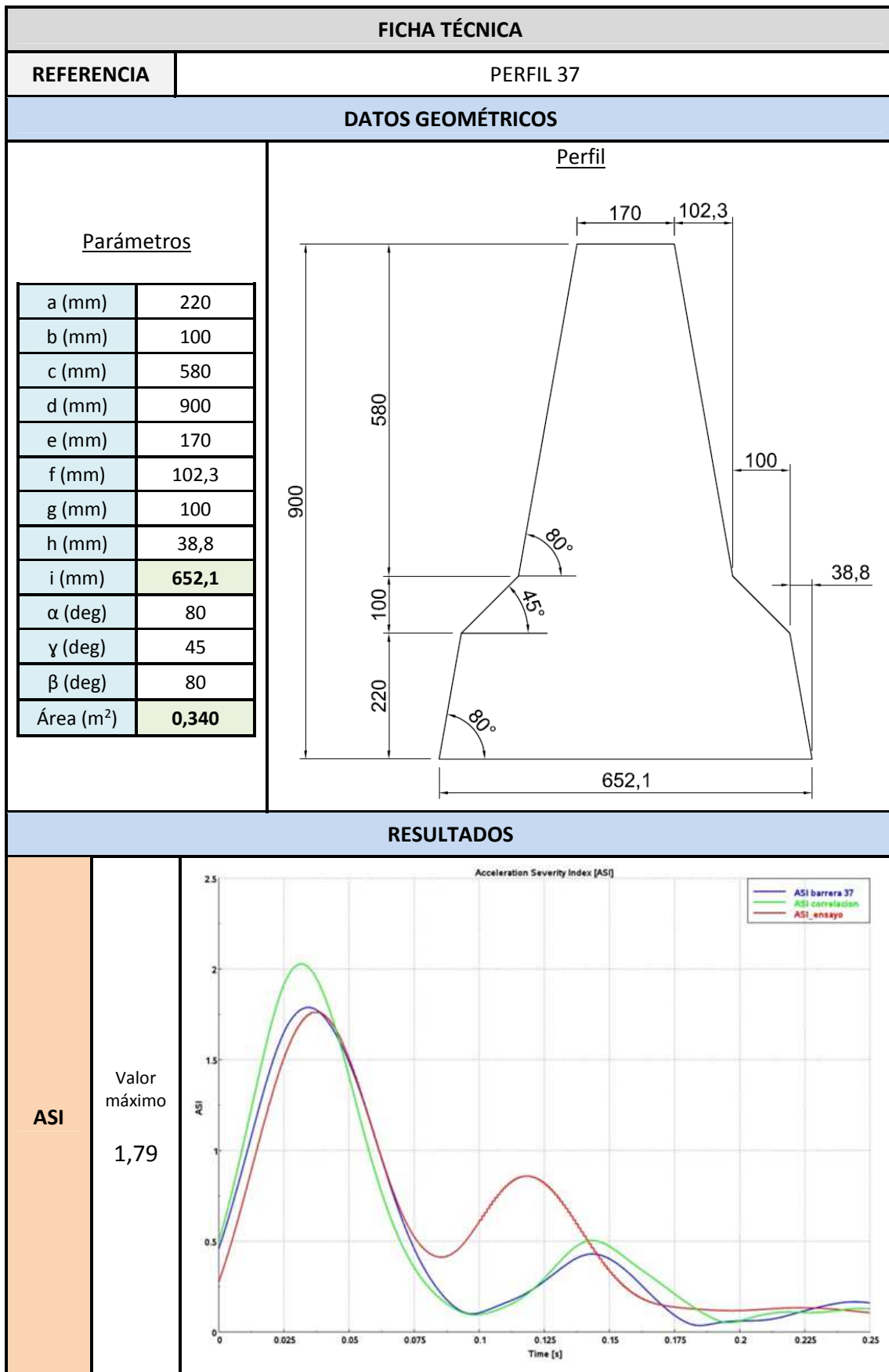
<b>Aceleraciones</b>			
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo	7	
	Valor máximo negativo	-31	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo	73	
	Valor máximo negativo	-5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo	17	
	Valor máximo negativo	-23	

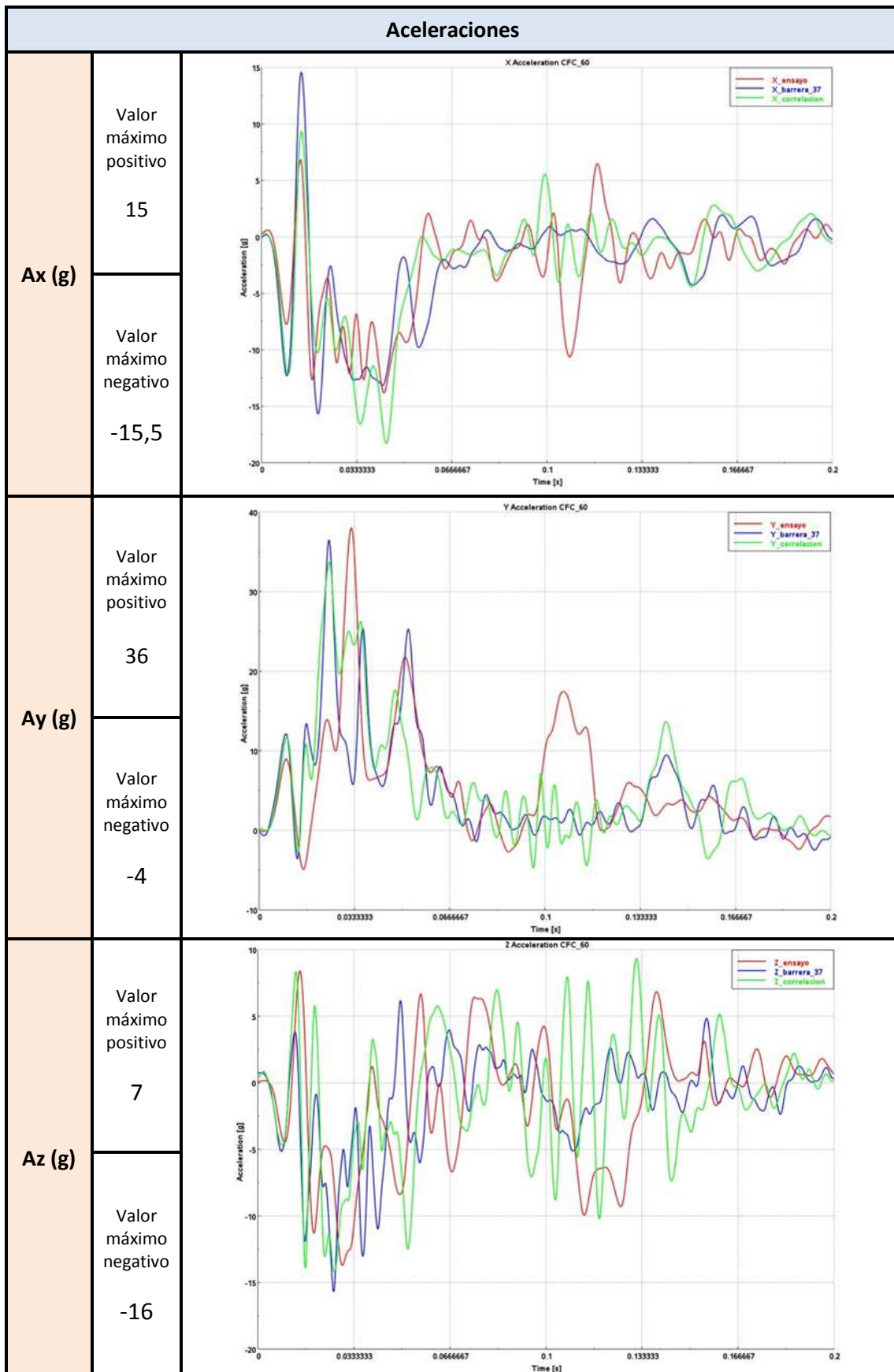
FICHA TÉCNICA																											
REFERENCIA	PERFIL 35																										
DATOS GEOMÉTRICOS																											
<p>Parámetros</p> <table border="1"> <tr><td>a (mm)</td><td>150</td></tr> <tr><td>b (mm)</td><td>100</td></tr> <tr><td>c (mm)</td><td>650</td></tr> <tr><td>d (mm)</td><td>900</td></tr> <tr><td>e (mm)</td><td>170</td></tr> <tr><td>f (mm)</td><td>114,6</td></tr> <tr><td>g (mm)</td><td>100</td></tr> <tr><td>h (mm)</td><td>26,5</td></tr> <tr><td>i (mm)</td><td>652,1</td></tr> <tr><td><math>\alpha</math> (deg)</td><td>80</td></tr> <tr><td><math>\gamma</math> (deg)</td><td>45</td></tr> <tr><td><math>\beta</math> (deg)</td><td>80</td></tr> <tr><td>Área (m<sup>2</sup>)</td><td>0,329</td></tr> </table>	a (mm)	150	b (mm)	100	c (mm)	650	d (mm)	900	e (mm)	170	f (mm)	114,6	g (mm)	100	h (mm)	26,5	i (mm)	652,1	$\alpha$ (deg)	80	$\gamma$ (deg)	45	$\beta$ (deg)	80	Área (m <sup>2</sup> )	0,329	<p>Perfil</p>
a (mm)	150																										
b (mm)	100																										
c (mm)	650																										
d (mm)	900																										
e (mm)	170																										
f (mm)	114,6																										
g (mm)	100																										
h (mm)	26,5																										
i (mm)	652,1																										
$\alpha$ (deg)	80																										
$\gamma$ (deg)	45																										
$\beta$ (deg)	80																										
Área (m <sup>2</sup> )	0,329																										
RESULTADOS																											
<p>ASI</p>	<p>Valor máximo</p> <p>1,82</p>																										





Aceleraciones			
Ax (g)	Valor máximo positivo	14	
	Valor máximo negativo	-18,5	
Ay (g)	Valor máximo positivo	32	
	Valor máximo negativo	-6	
Az (g)	Valor máximo positivo	6,5	
	Valor máximo negativo	-16	

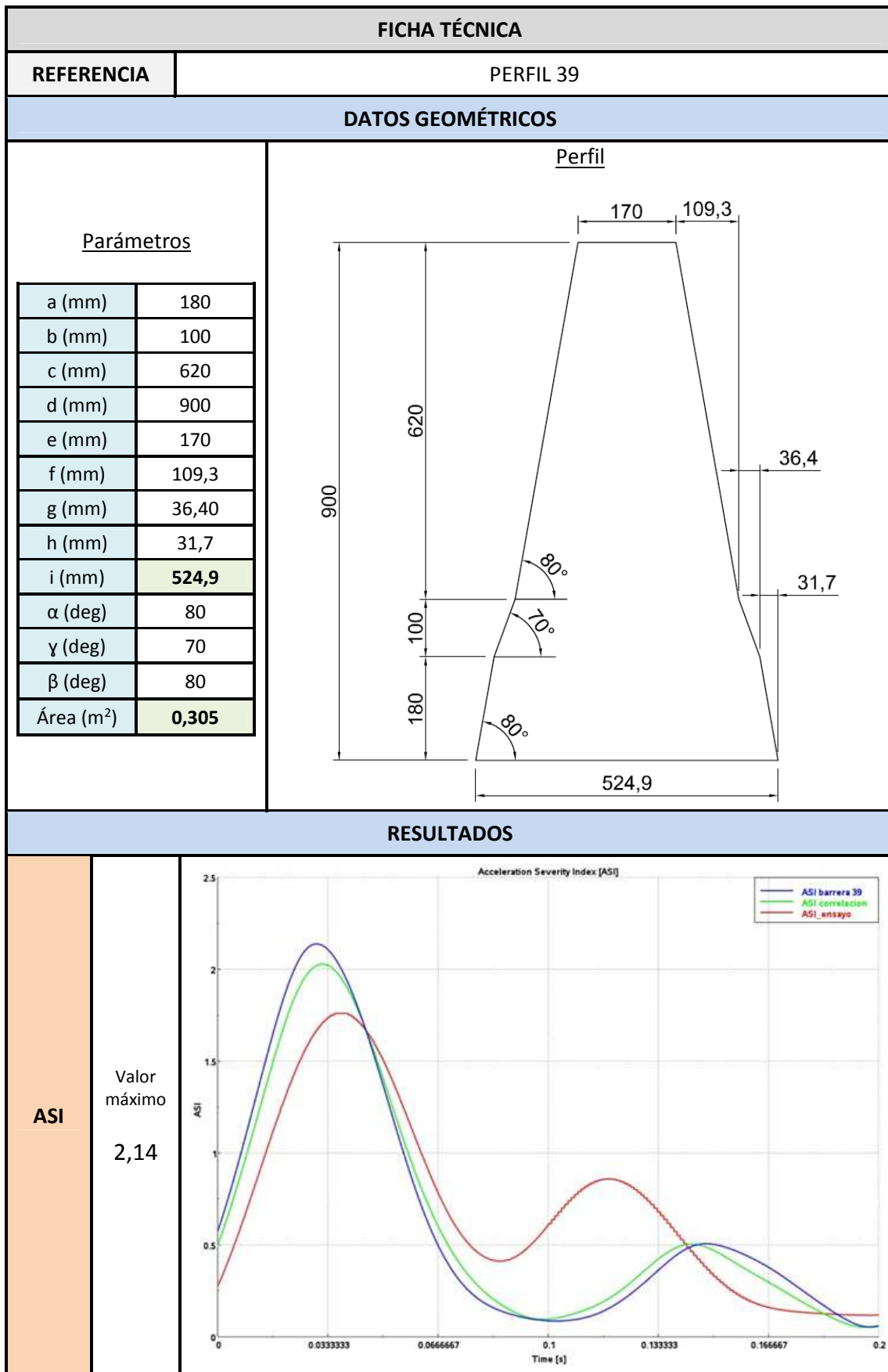




FICHA TÉCNICA																											
REFERENCIA	PERFIL 38																										
DATOS GEOMÉTRICOS																											
Parámetros	Perfil																										
<table border="1"> <tr><td>a (mm)</td><td>150</td></tr> <tr><td>b (mm)</td><td>100</td></tr> <tr><td>c (mm)</td><td>650</td></tr> <tr><td>d (mm)</td><td>900</td></tr> <tr><td>e (mm)</td><td>170</td></tr> <tr><td>f (mm)</td><td>114,6</td></tr> <tr><td>g (mm)</td><td>36,4</td></tr> <tr><td>h (mm)</td><td>26,5</td></tr> <tr><td>i (mm)</td><td><b>524,9</b></td></tr> <tr><td>α (deg)</td><td>80</td></tr> <tr><td>γ (deg)</td><td>70</td></tr> <tr><td>β (deg)</td><td>80</td></tr> <tr><td>Área (m<sup>2</sup>)</td><td><b>0,303</b></td></tr> </table>	a (mm)	150	b (mm)	100	c (mm)	650	d (mm)	900	e (mm)	170	f (mm)	114,6	g (mm)	36,4	h (mm)	26,5	i (mm)	<b>524,9</b>	α (deg)	80	γ (deg)	70	β (deg)	80	Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,303</b>	
a (mm)	150																										
b (mm)	100																										
c (mm)	650																										
d (mm)	900																										
e (mm)	170																										
f (mm)	114,6																										
g (mm)	36,4																										
h (mm)	26,5																										
i (mm)	<b>524,9</b>																										
α (deg)	80																										
γ (deg)	70																										
β (deg)	80																										
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,303</b>																										
RESULTADOS																											
ASI	<table border="1"> <tr> <td>Valor máximo</td> <td>2,18</td> </tr> </table>	Valor máximo	2,18																								
Valor máximo	2,18																										

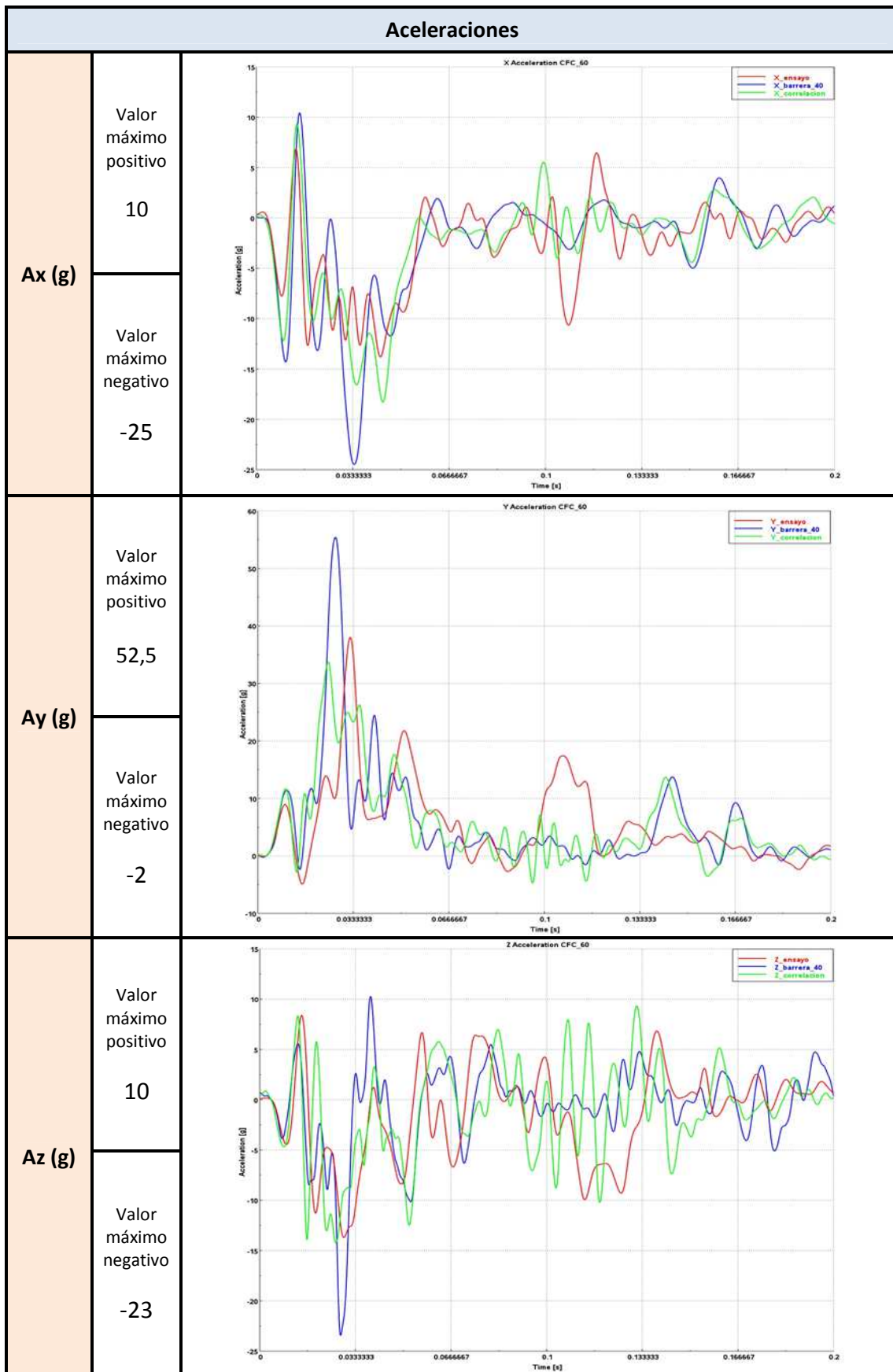


Aceleraciones			
Ax (g)	Valor máximo positivo	10	
	Valor máximo negativo	-25	
Ay (g)	Valor máximo positivo	53	
	Valor máximo negativo	-4	
Az (g)	Valor máximo positivo	9	
	Valor máximo negativo	-18	



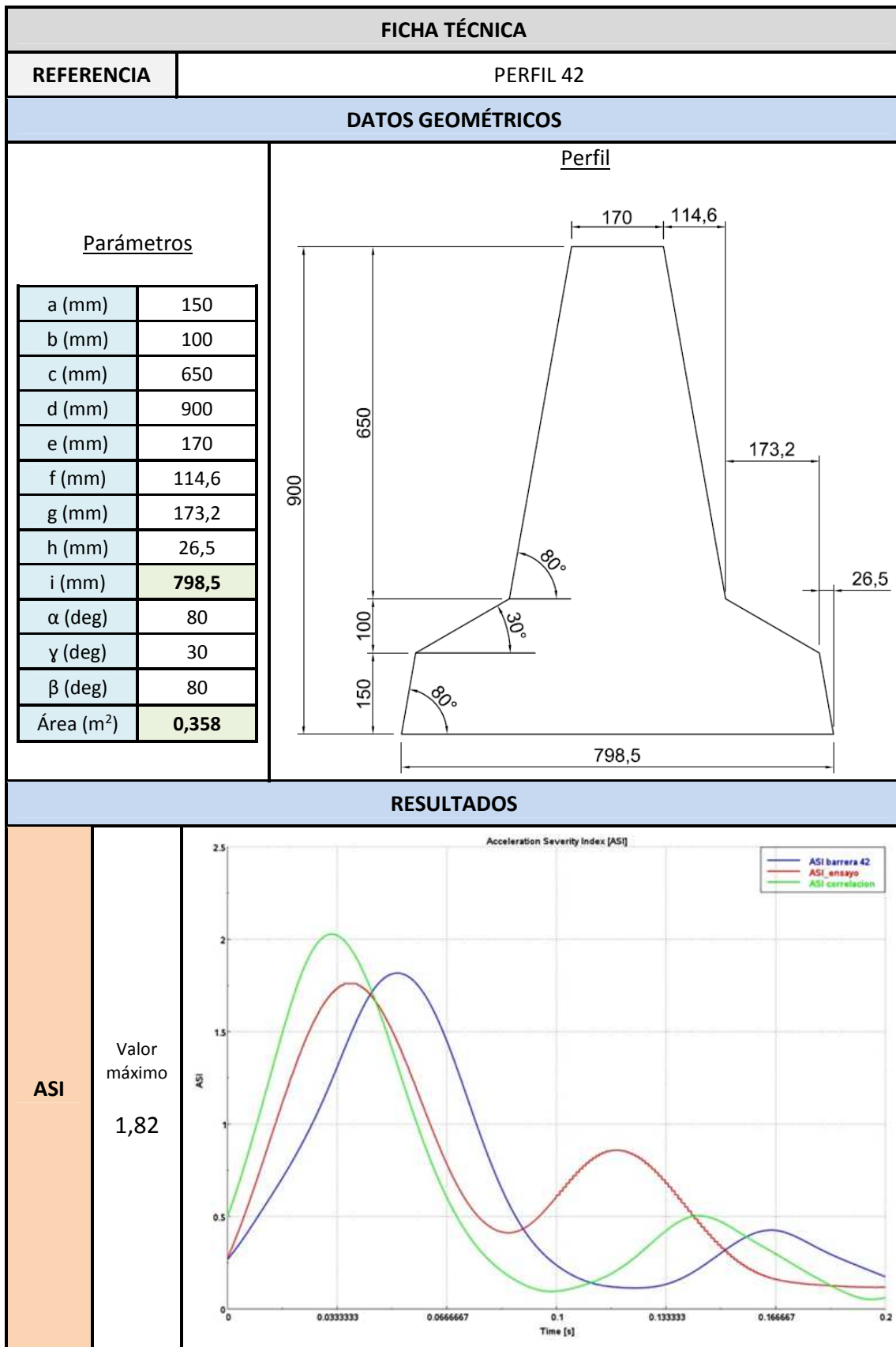
Aceleraciones		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  11	
	Valor máximo negativo  -24	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  49	
	Valor máximo negativo  -3	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  8	
	Valor máximo negativo  -22	

FICHA TÉCNICA																											
REFERENCIA	PERFIL 40																										
DATOS GEOMÉTRICOS																											
Parámetros	Perfil																										
<table border="1"> <tr><td>a (mm)</td><td>200</td></tr> <tr><td>b (mm)</td><td>100</td></tr> <tr><td>c (mm)</td><td>600</td></tr> <tr><td>d (mm)</td><td>900</td></tr> <tr><td>e (mm)</td><td>170</td></tr> <tr><td>f (mm)</td><td>105,8</td></tr> <tr><td>g (mm)</td><td>36,4</td></tr> <tr><td>h (mm)</td><td>35,3</td></tr> <tr><td>i (mm)</td><td><b>524,9</b></td></tr> <tr><td><math>\alpha</math> (deg)</td><td>80</td></tr> <tr><td><math>\gamma</math> (deg)</td><td>70</td></tr> <tr><td><math>\beta</math> (deg)</td><td>80</td></tr> <tr><td>Área (m<sup>2</sup>)</td><td><b>0,305</b></td></tr> </table>	a (mm)	200	b (mm)	100	c (mm)	600	d (mm)	900	e (mm)	170	f (mm)	105,8	g (mm)	36,4	h (mm)	35,3	i (mm)	<b>524,9</b>	$\alpha$ (deg)	80	$\gamma$ (deg)	70	$\beta$ (deg)	80	Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,305</b>	
a (mm)	200																										
b (mm)	100																										
c (mm)	600																										
d (mm)	900																										
e (mm)	170																										
f (mm)	105,8																										
g (mm)	36,4																										
h (mm)	35,3																										
i (mm)	<b>524,9</b>																										
$\alpha$ (deg)	80																										
$\gamma$ (deg)	70																										
$\beta$ (deg)	80																										
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,305</b>																										
RESULTADOS																											
ASI	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">Valor máximo</td> <td style="text-align: center;">2,14</td> </tr> </table>	Valor máximo	2,14																								
Valor máximo	2,14																										



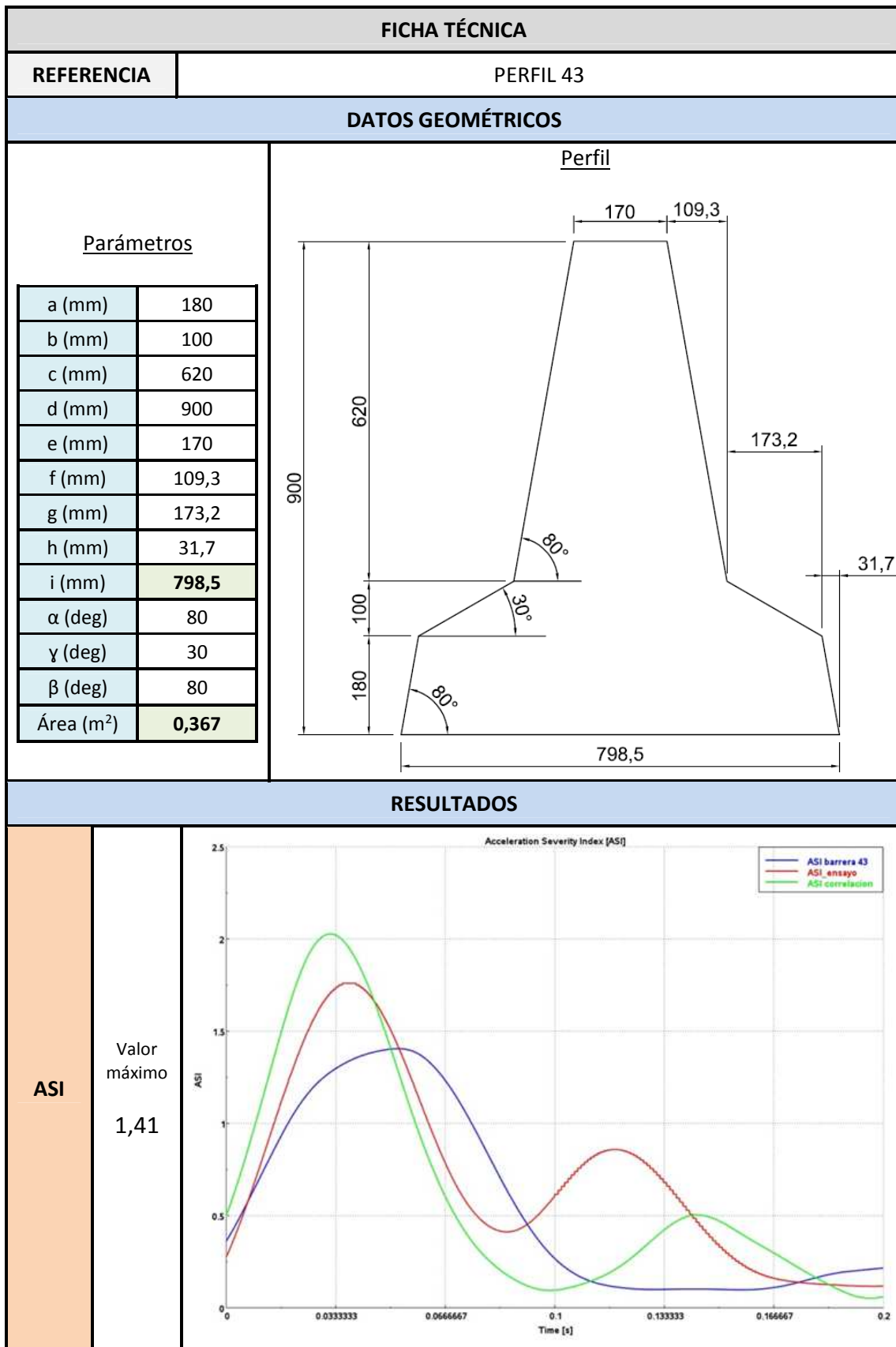
FICHA TÉCNICA																											
REFERENCIA	PERFIL 41																										
DATOS GEOMÉTRICOS																											
Parámetros	Perfil																										
<table border="1"> <tr><td>a (mm)</td><td>220</td></tr> <tr><td>b (mm)</td><td>100</td></tr> <tr><td>c (mm)</td><td>580</td></tr> <tr><td>d (mm)</td><td>900</td></tr> <tr><td>e (mm)</td><td>170</td></tr> <tr><td>f (mm)</td><td>102,3</td></tr> <tr><td>g (mm)</td><td>36,4</td></tr> <tr><td>h (mm)</td><td>38,8</td></tr> <tr><td>i (mm)</td><td><b>524,9</b></td></tr> <tr><td><math>\alpha</math> (deg)</td><td>80</td></tr> <tr><td><math>\gamma</math> (deg)</td><td>70</td></tr> <tr><td><math>\beta</math> (deg)</td><td>80</td></tr> <tr><td>Área (m<sup>2</sup>)</td><td><b>0,306</b></td></tr> </table>	a (mm)	220	b (mm)	100	c (mm)	580	d (mm)	900	e (mm)	170	f (mm)	102,3	g (mm)	36,4	h (mm)	38,8	i (mm)	<b>524,9</b>	$\alpha$ (deg)	80	$\gamma$ (deg)	70	$\beta$ (deg)	80	Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,306</b>	
a (mm)	220																										
b (mm)	100																										
c (mm)	580																										
d (mm)	900																										
e (mm)	170																										
f (mm)	102,3																										
g (mm)	36,4																										
h (mm)	38,8																										
i (mm)	<b>524,9</b>																										
$\alpha$ (deg)	80																										
$\gamma$ (deg)	70																										
$\beta$ (deg)	80																										
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,306</b>																										
RESULTADOS																											
ASI	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">Valor máximo</td> <td style="text-align: center;">2,14</td> </tr> </table>	Valor máximo	2,14																								
Valor máximo	2,14																										

Aceleraciones			
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo	9	
	Valor máximo negativo	-25	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo	51	
	Valor máximo negativo	-5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo	7	
	Valor máximo negativo	-23	

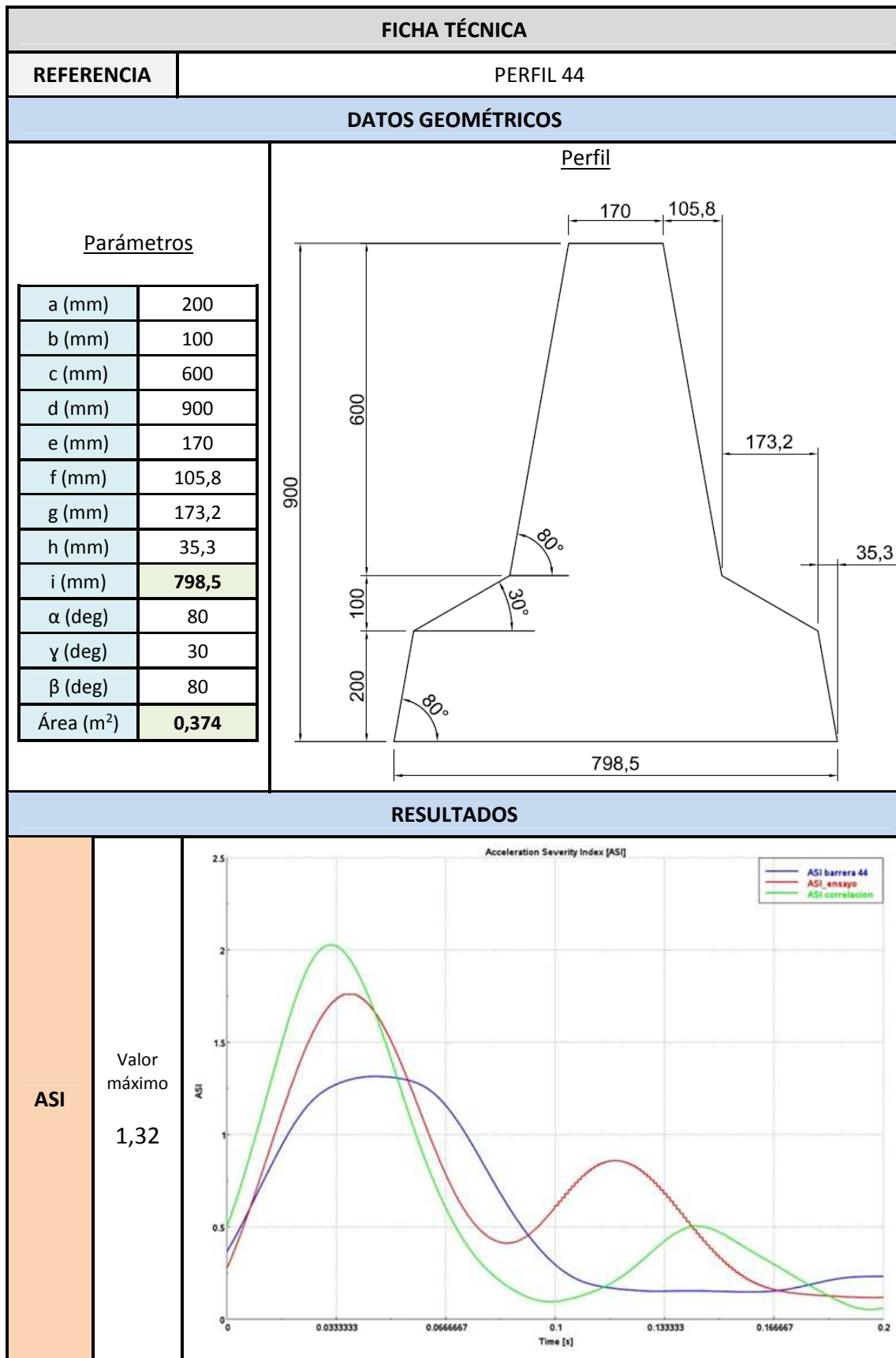


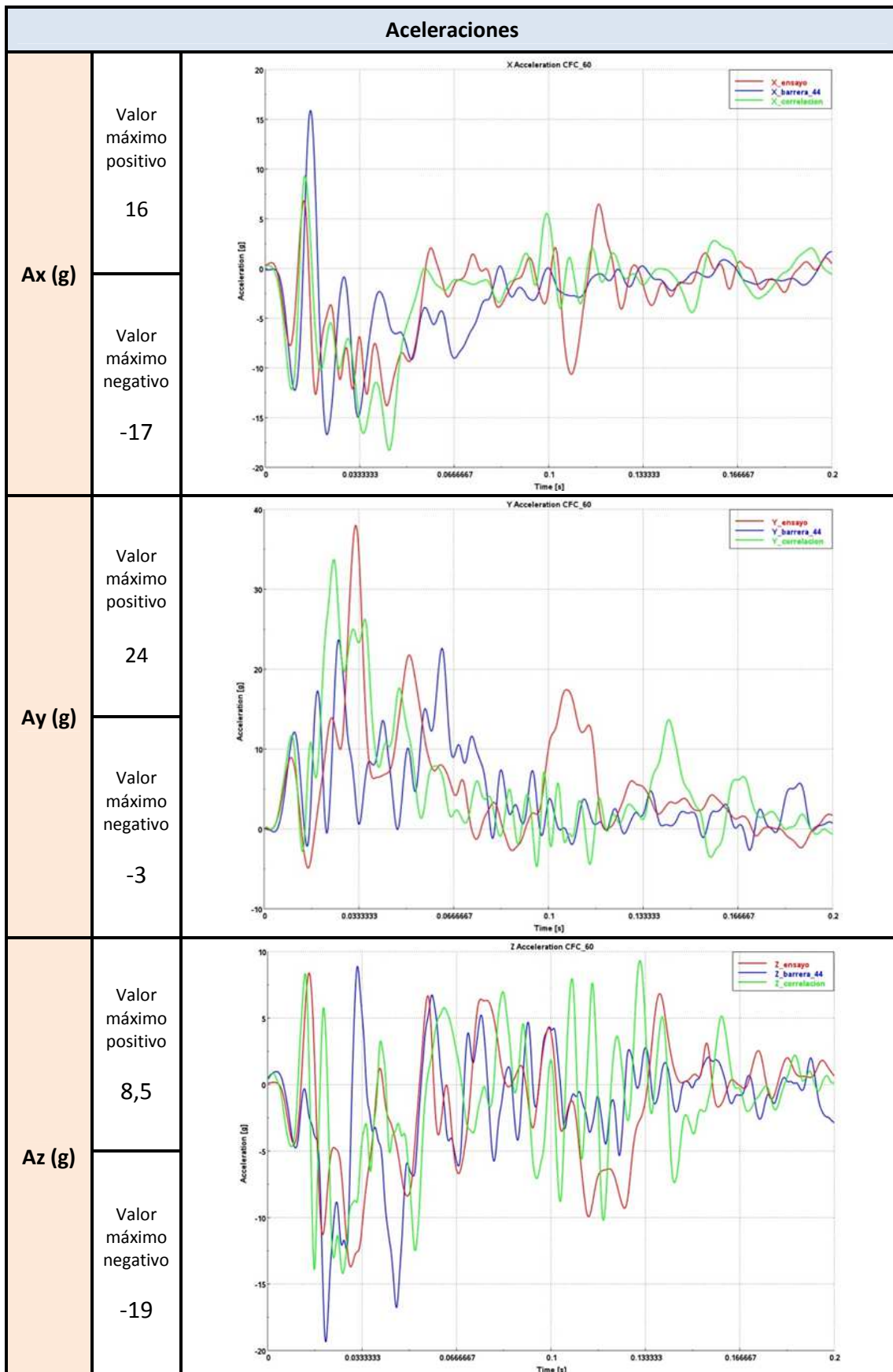


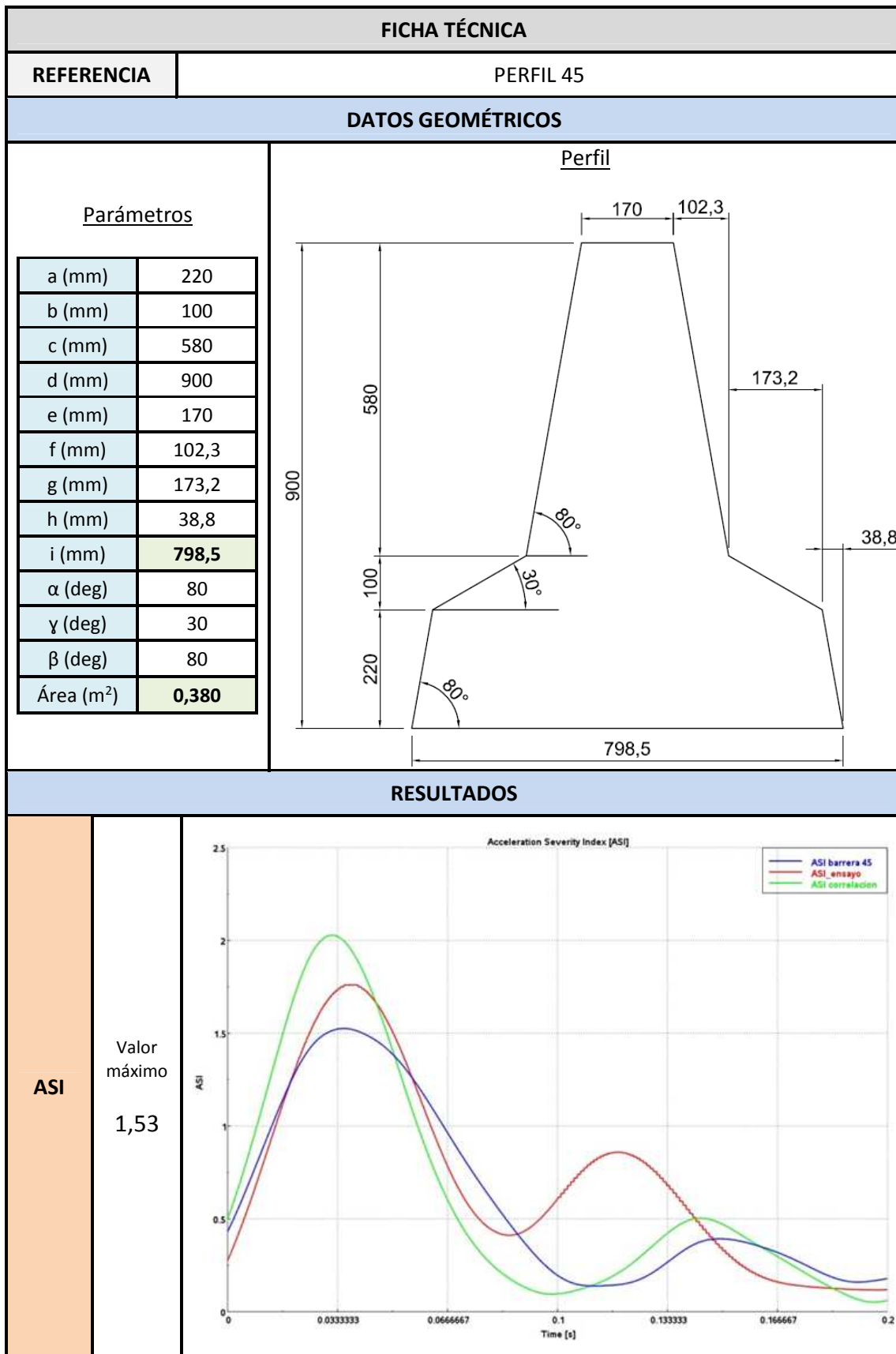
<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  8	
	Valor máximo negativo  -13	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  28,5	
	Valor máximo negativo  -4	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  8,5	
	Valor máximo negativo  -20	



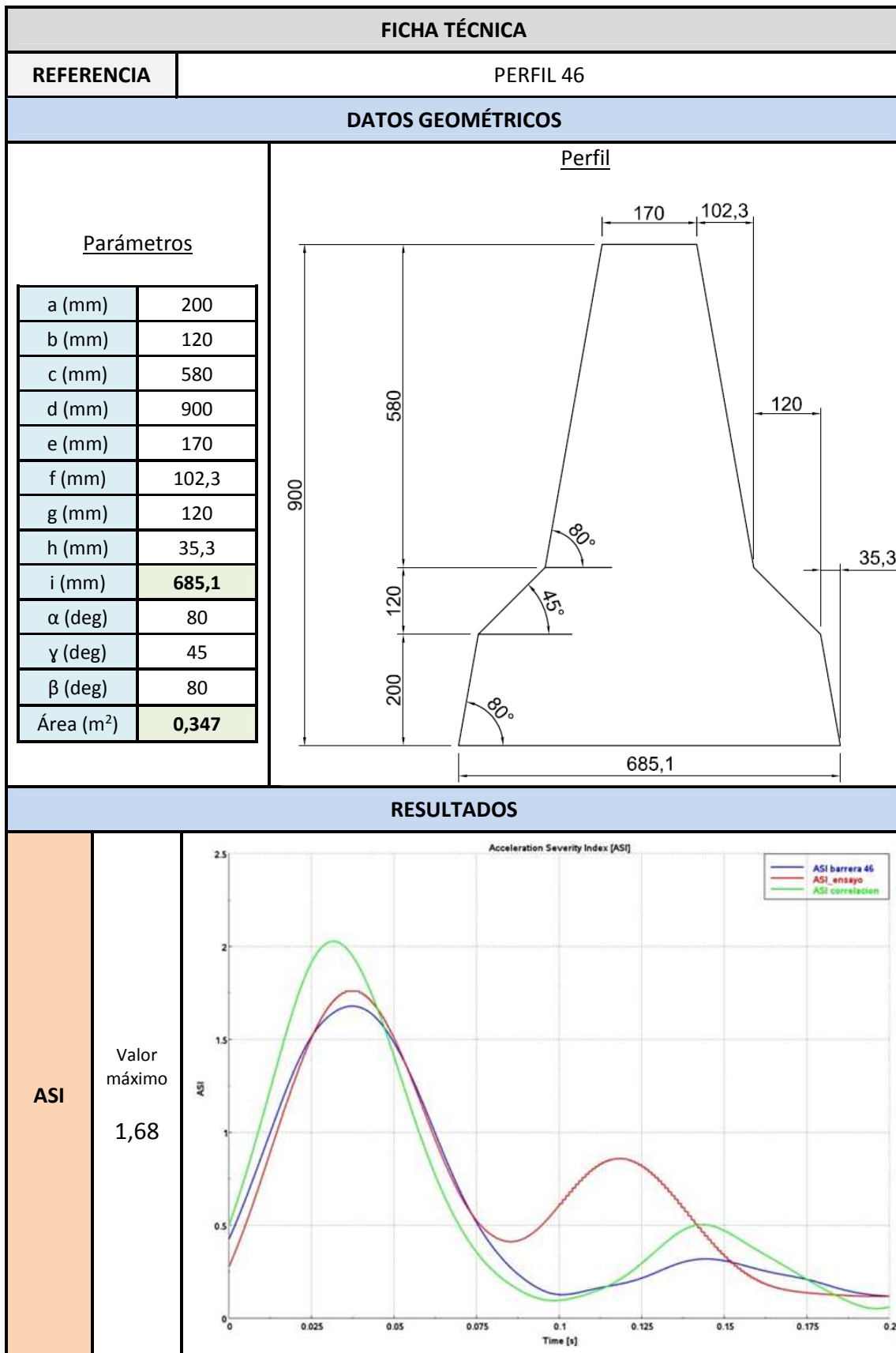
Aceleraciones			
Ax (g)	Valor máximo positivo	12	
	Valor máximo negativo	-13	
Ay (g)	Valor máximo positivo	27	
	Valor máximo negativo	-6	
Az (g)	Valor máximo positivo	8	
	Valor máximo negativo	-20	





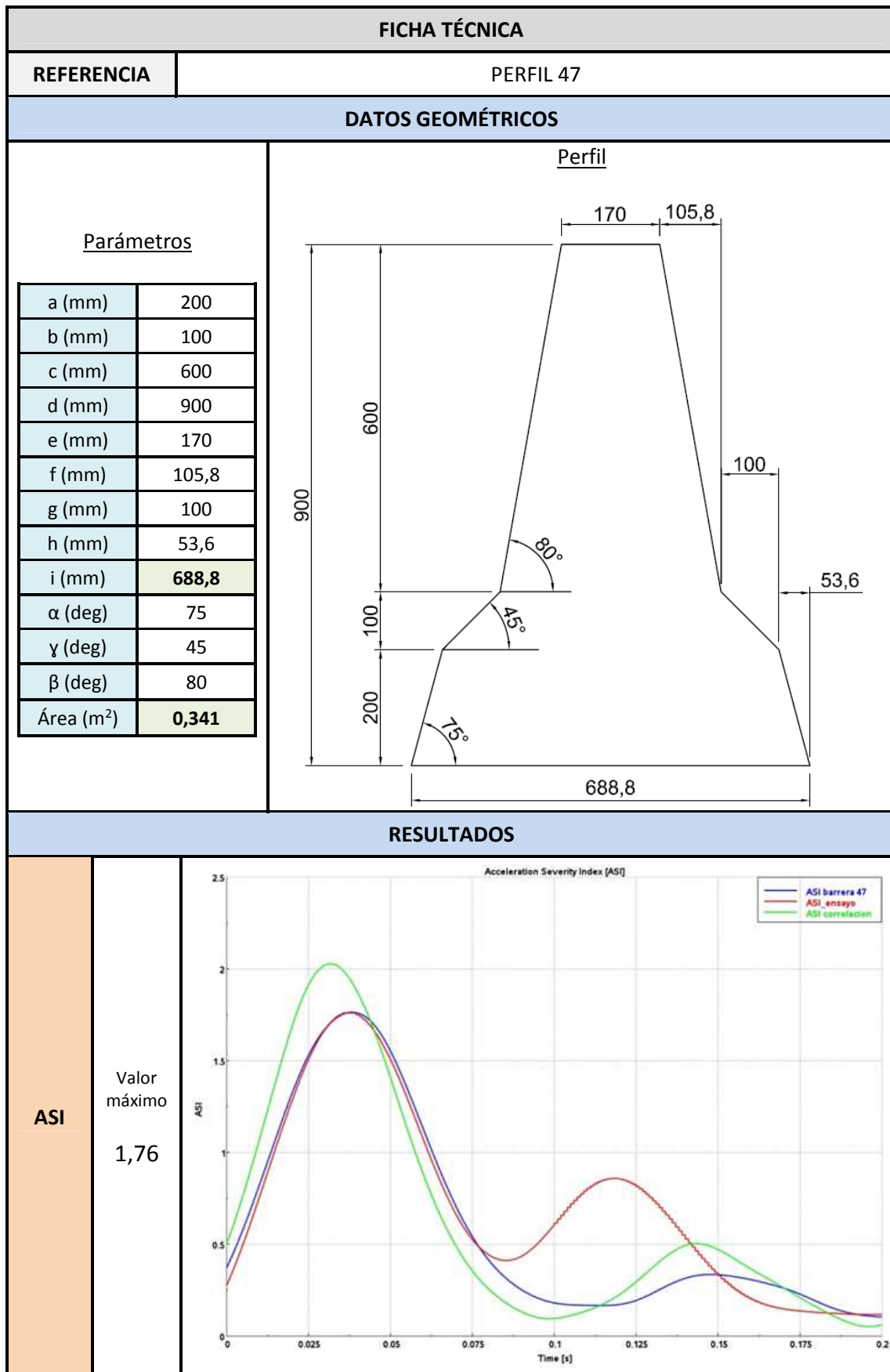


<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  15	
	Valor máximo negativo  -16,5	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  38	
	Valor máximo negativo  -13	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  8	
	Valor máximo negativo  -17	

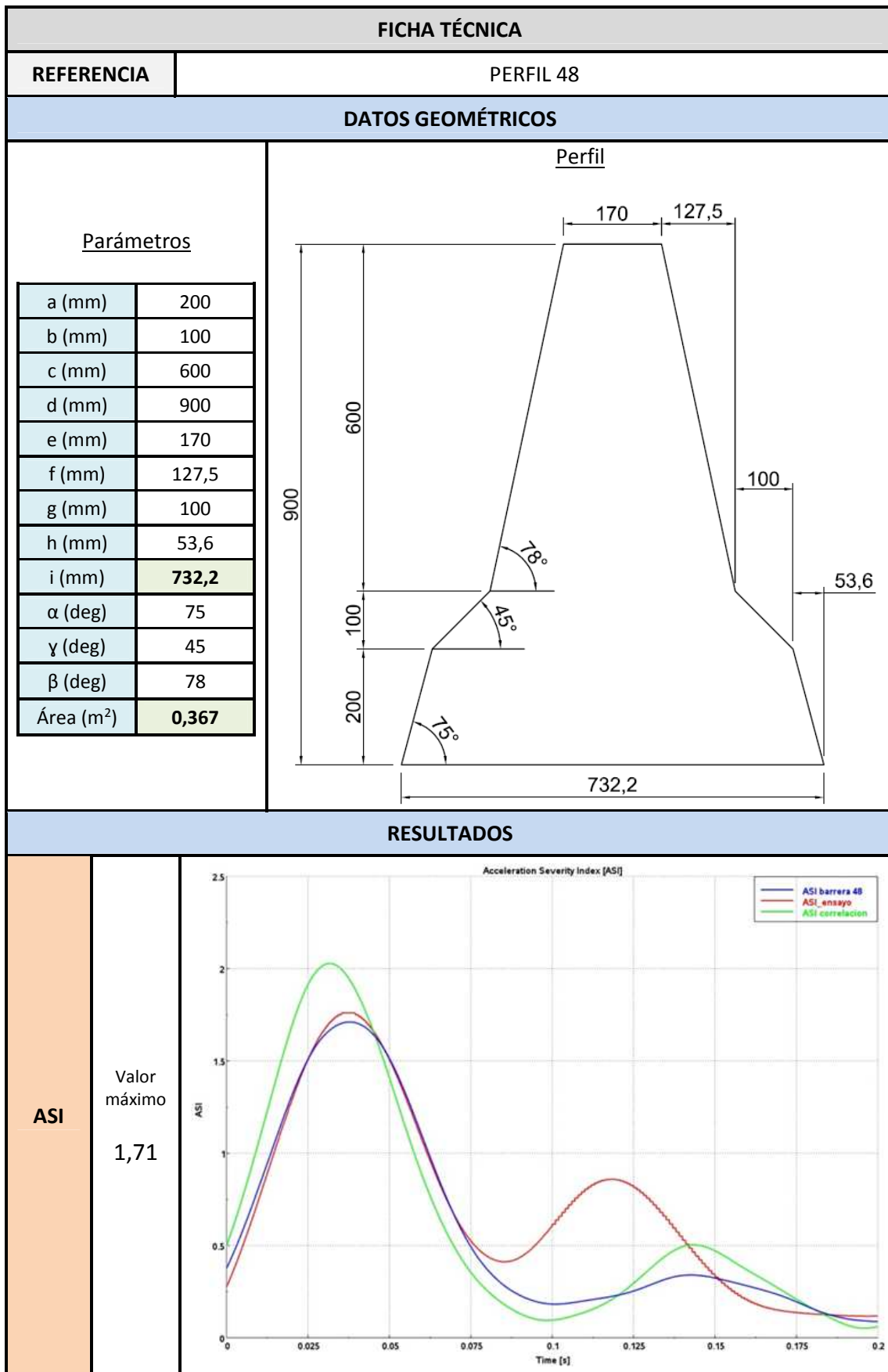




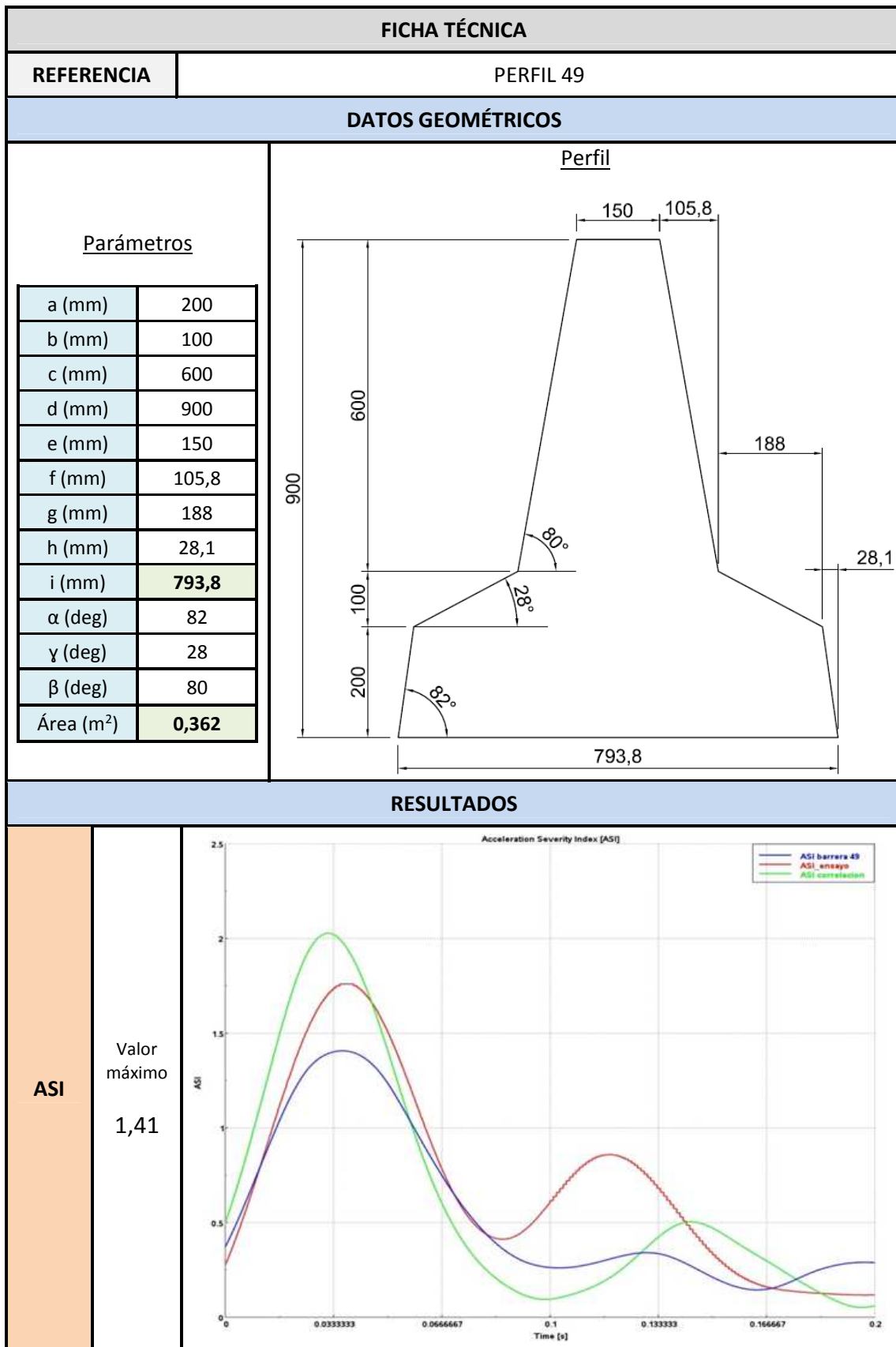
Aceleraciones			
Ax (g)	Valor máximo positivo	16	
	Valor máximo negativo	-17	
Ay (g)	Valor máximo positivo	31,5	
	Valor máximo negativo	-4	
Az (g)	Valor máximo positivo	7	
	Valor máximo negativo	-21	

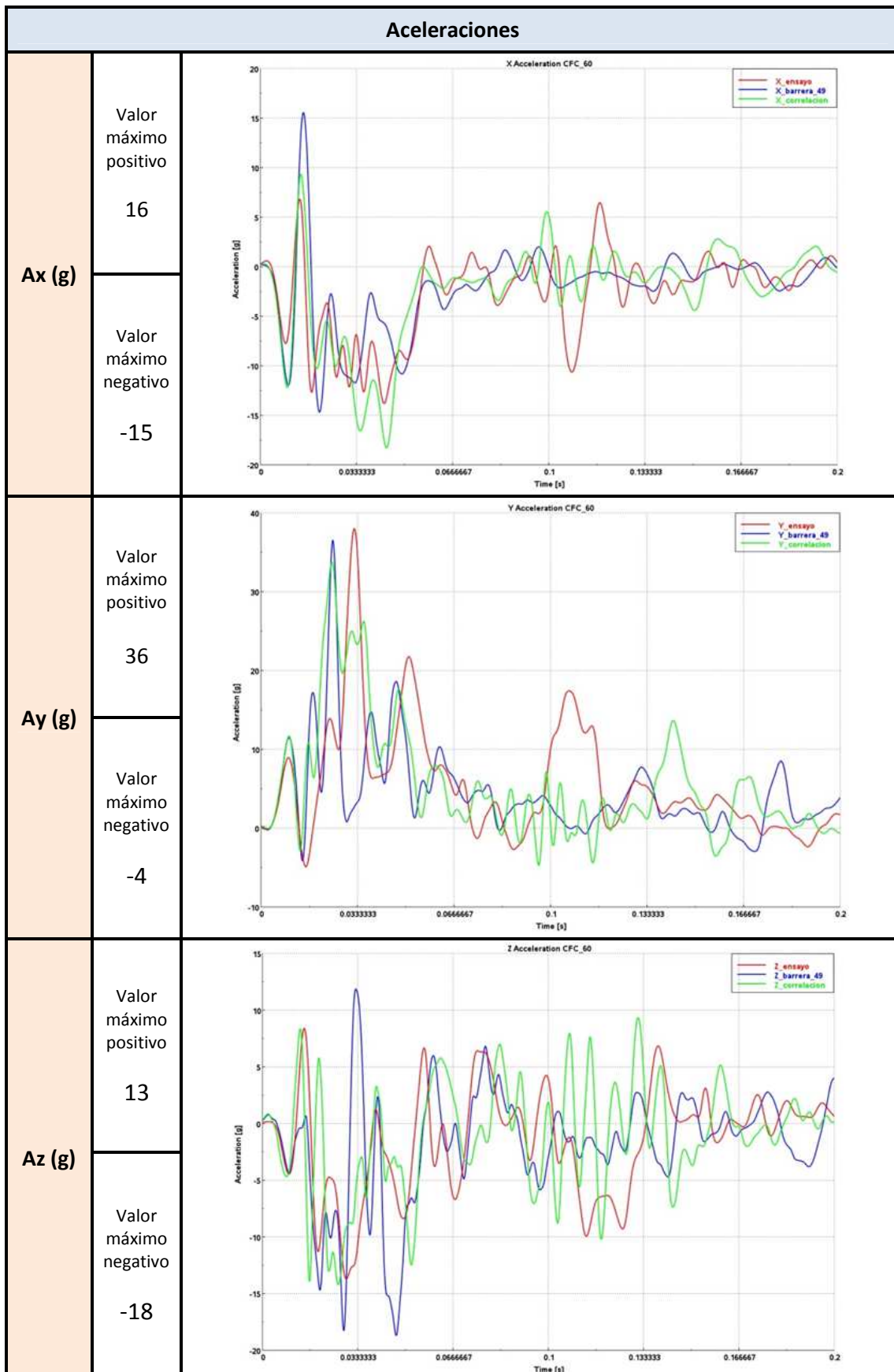


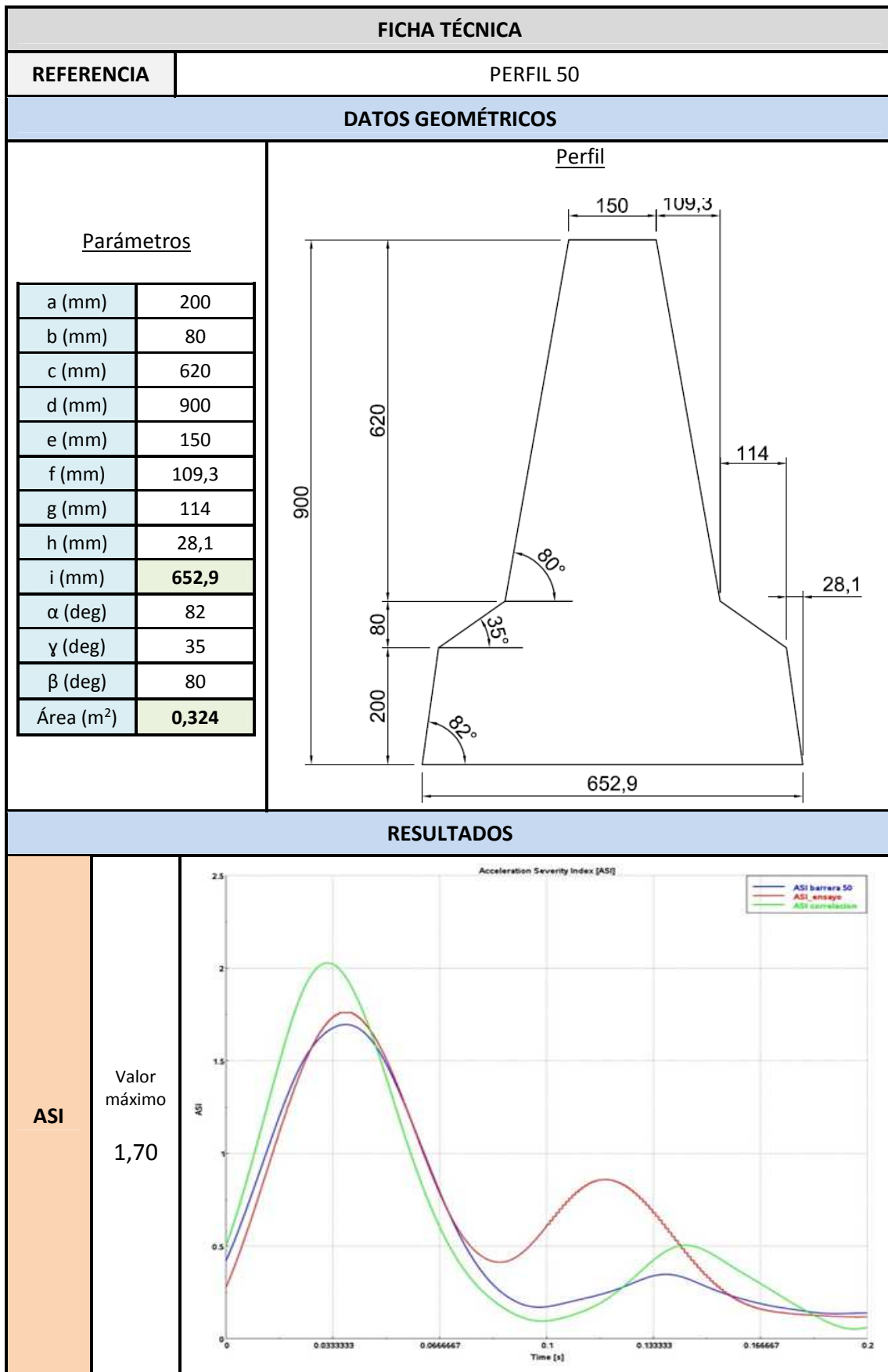
Aceleraciones			
Ax (g)	Valor máximo positivo	15,5	
	Valor máximo negativo	-19	
Ay (g)	Valor máximo positivo	30	
	Valor máximo negativo	-5	
Az (g)	Valor máximo positivo	7	
	Valor máximo negativo	-16	



<b>Aceleraciones</b>			
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo	16	
	Valor máximo negativo	-19	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo	34	
	Valor máximo negativo	-5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo	4	
	Valor máximo negativo	-16	

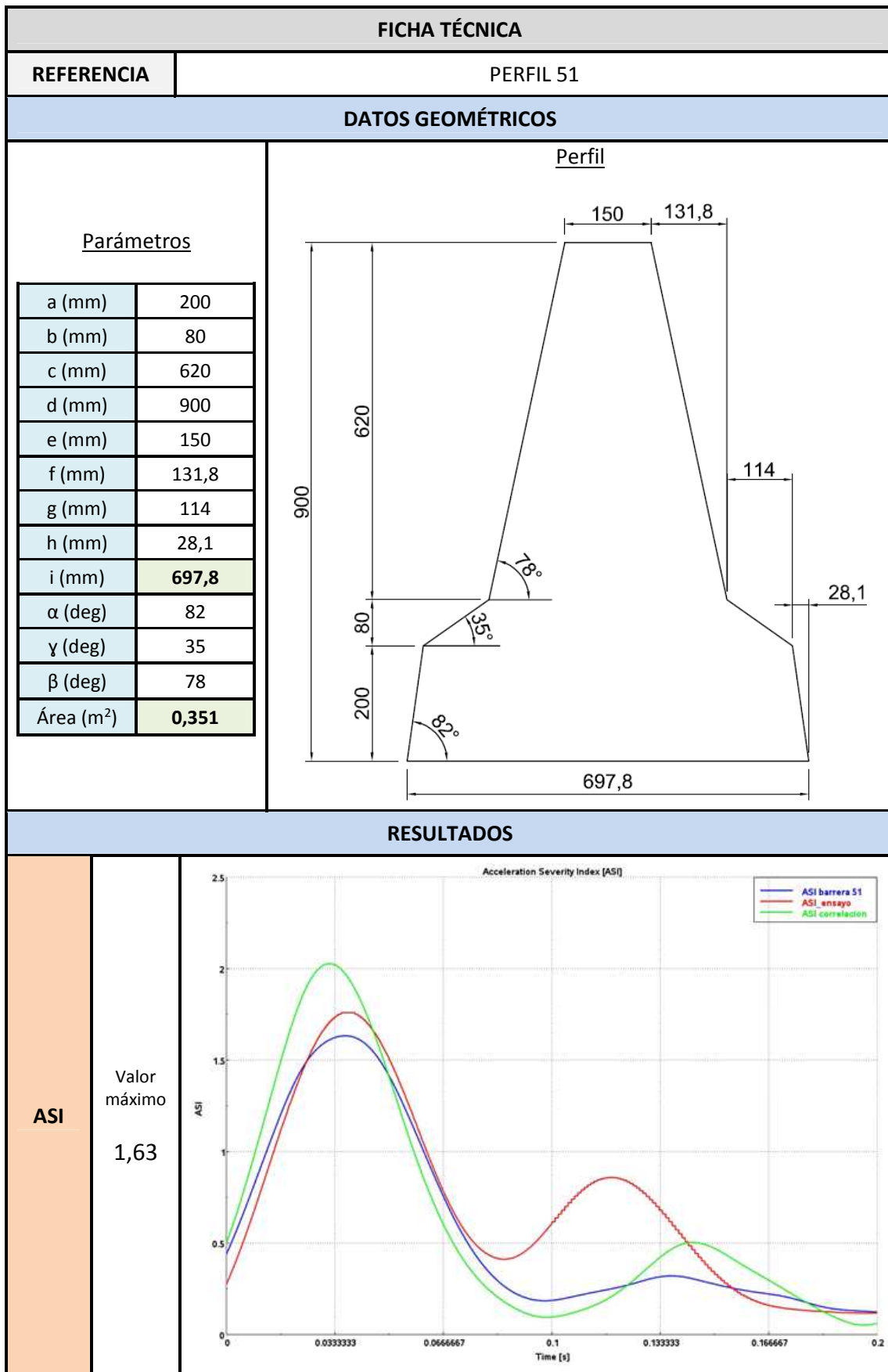


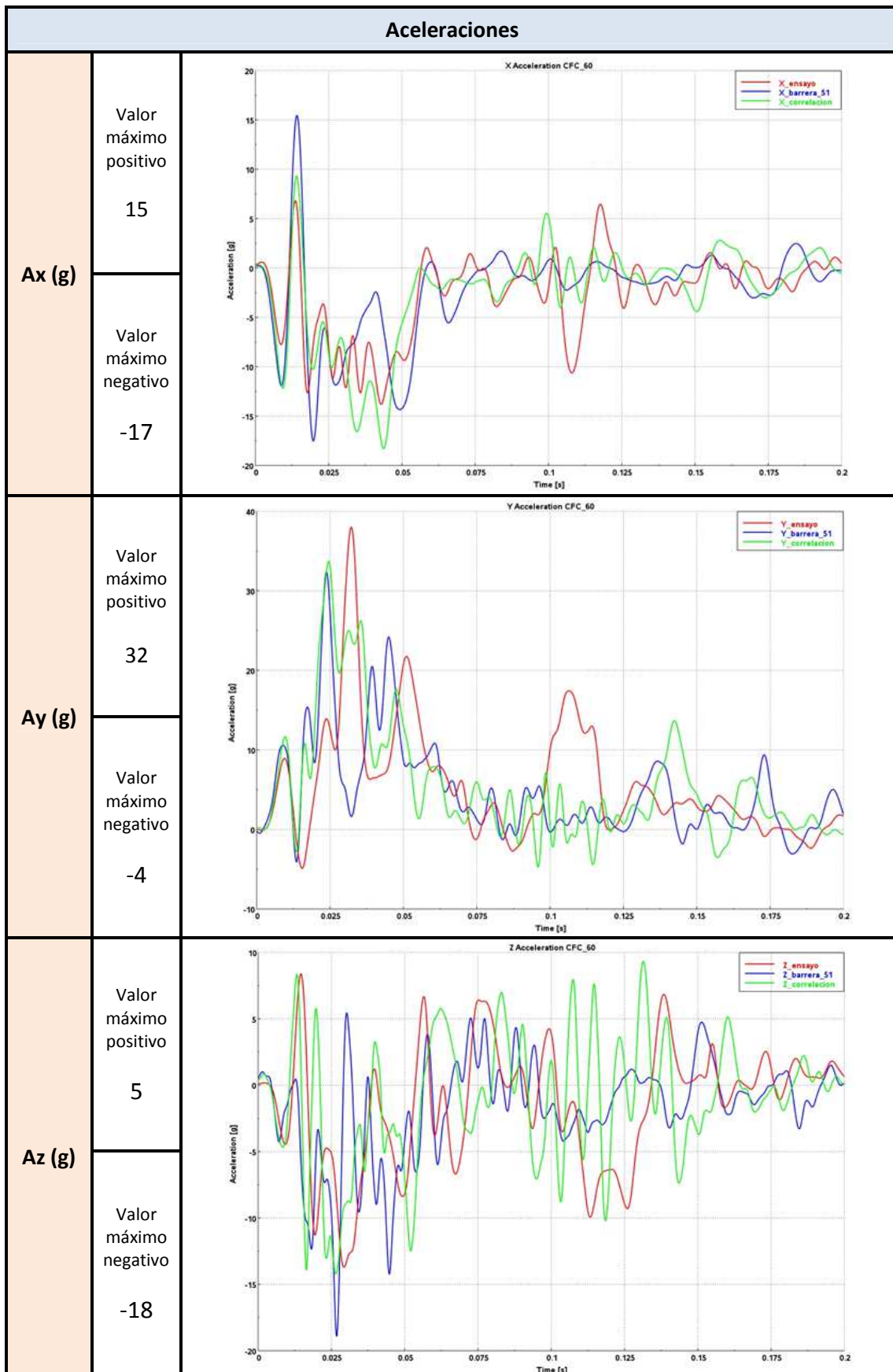


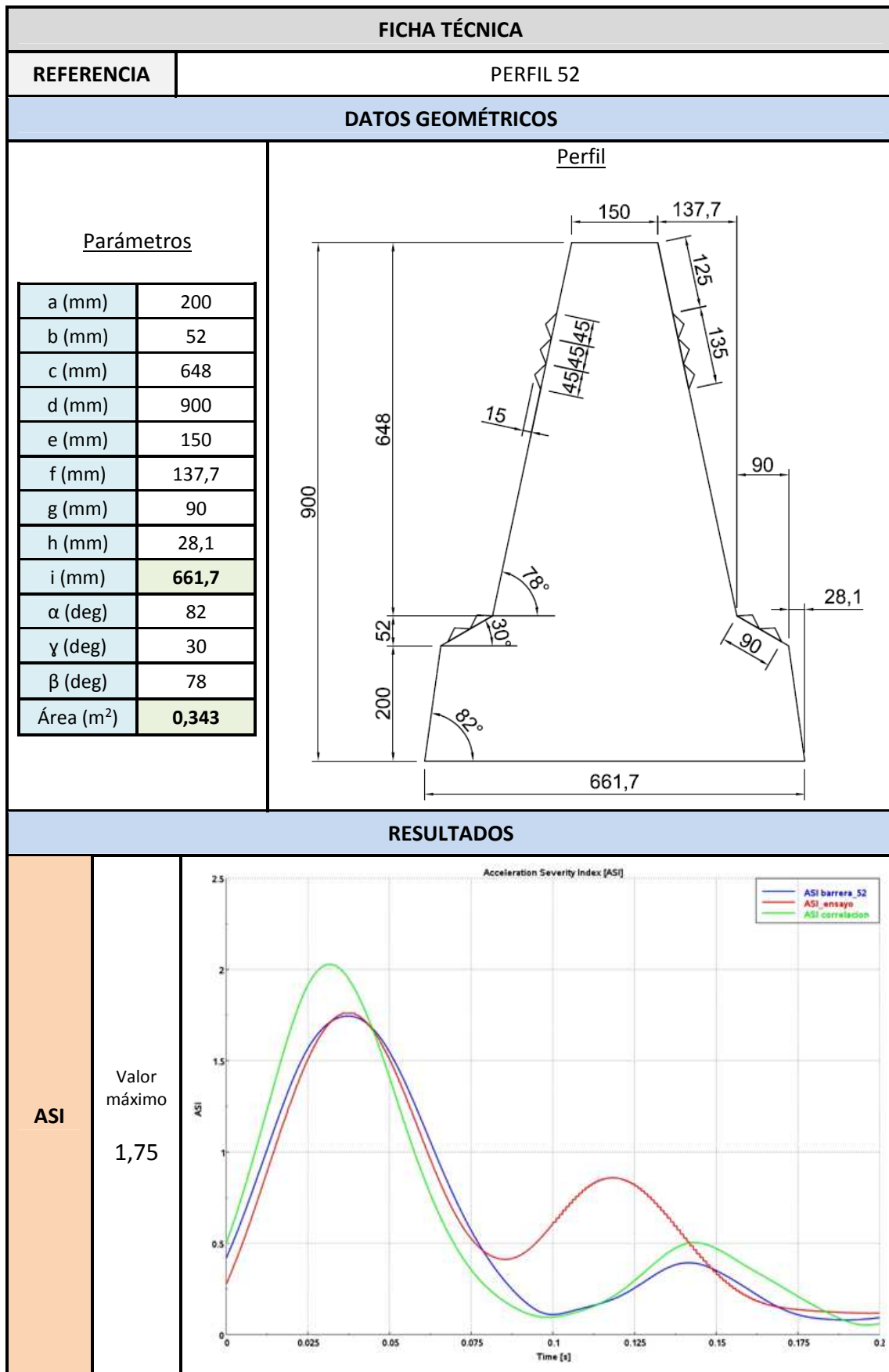




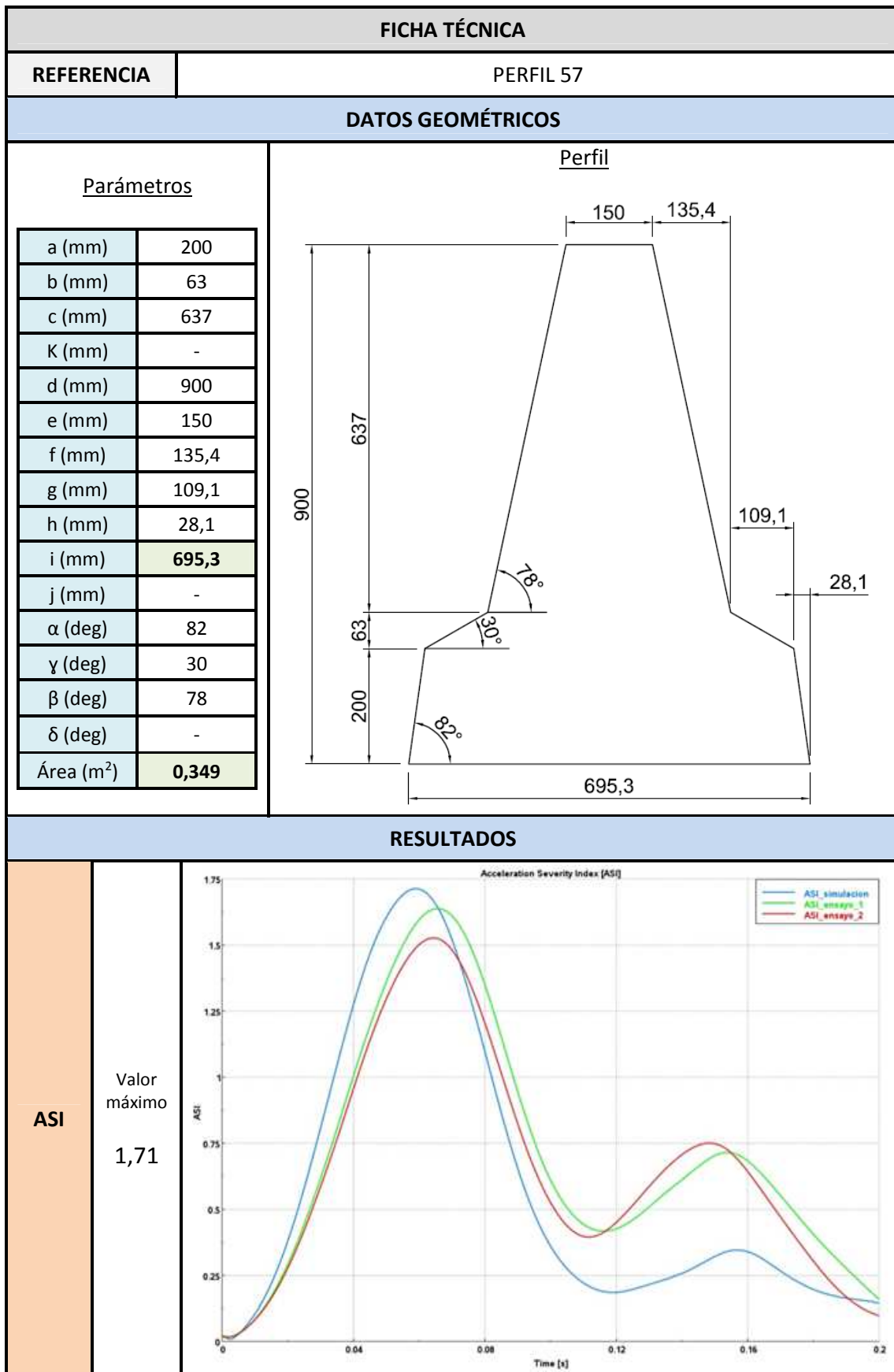
Aceleraciones			
Ax (g)	Valor máximo positivo	16	
	Valor máximo negativo	-18	
Ay (g)	Valor máximo positivo	33	
	Valor máximo negativo	-4	
Az (g)	Valor máximo positivo	6	
	Valor máximo negativo	-18	

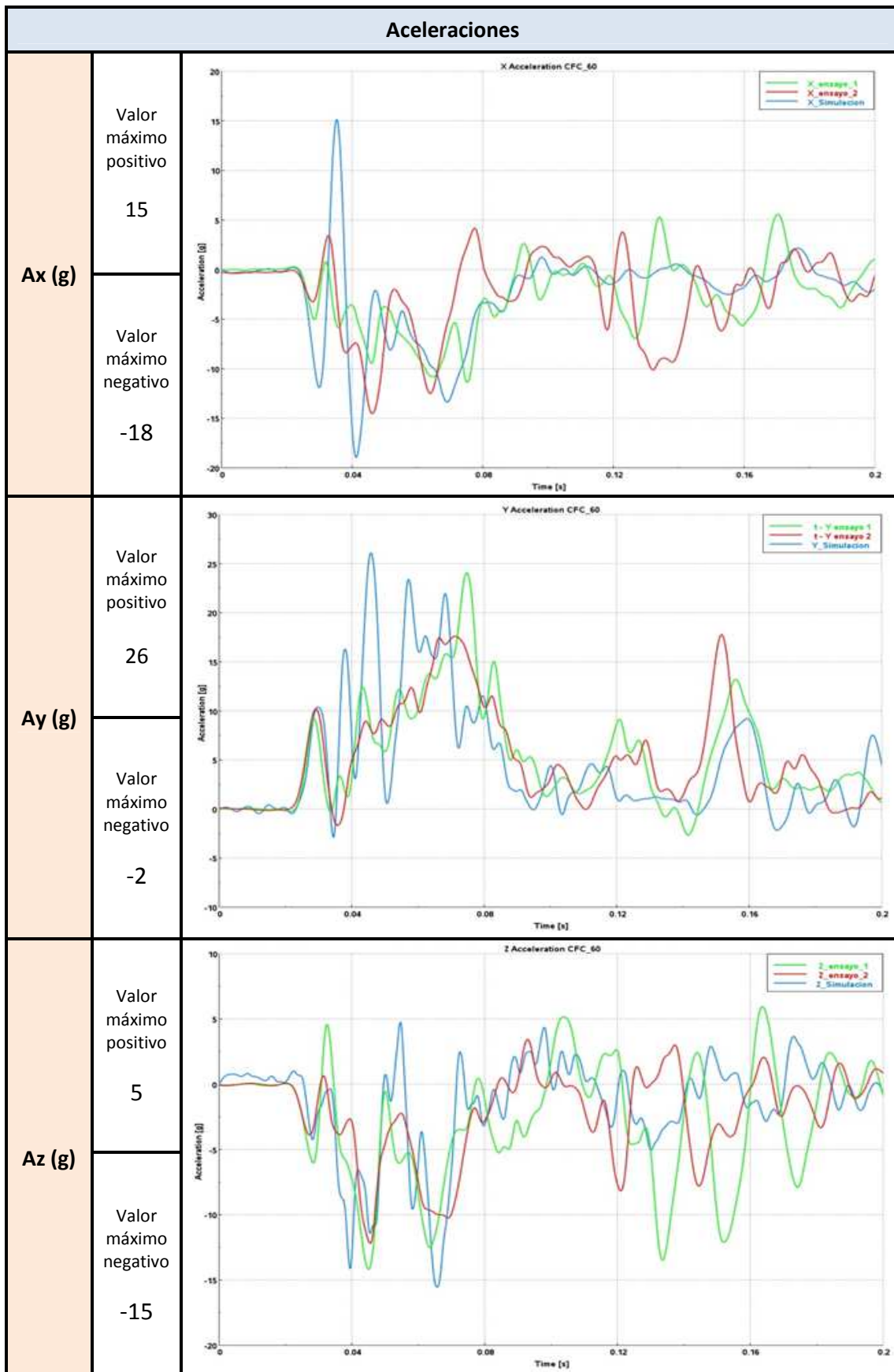


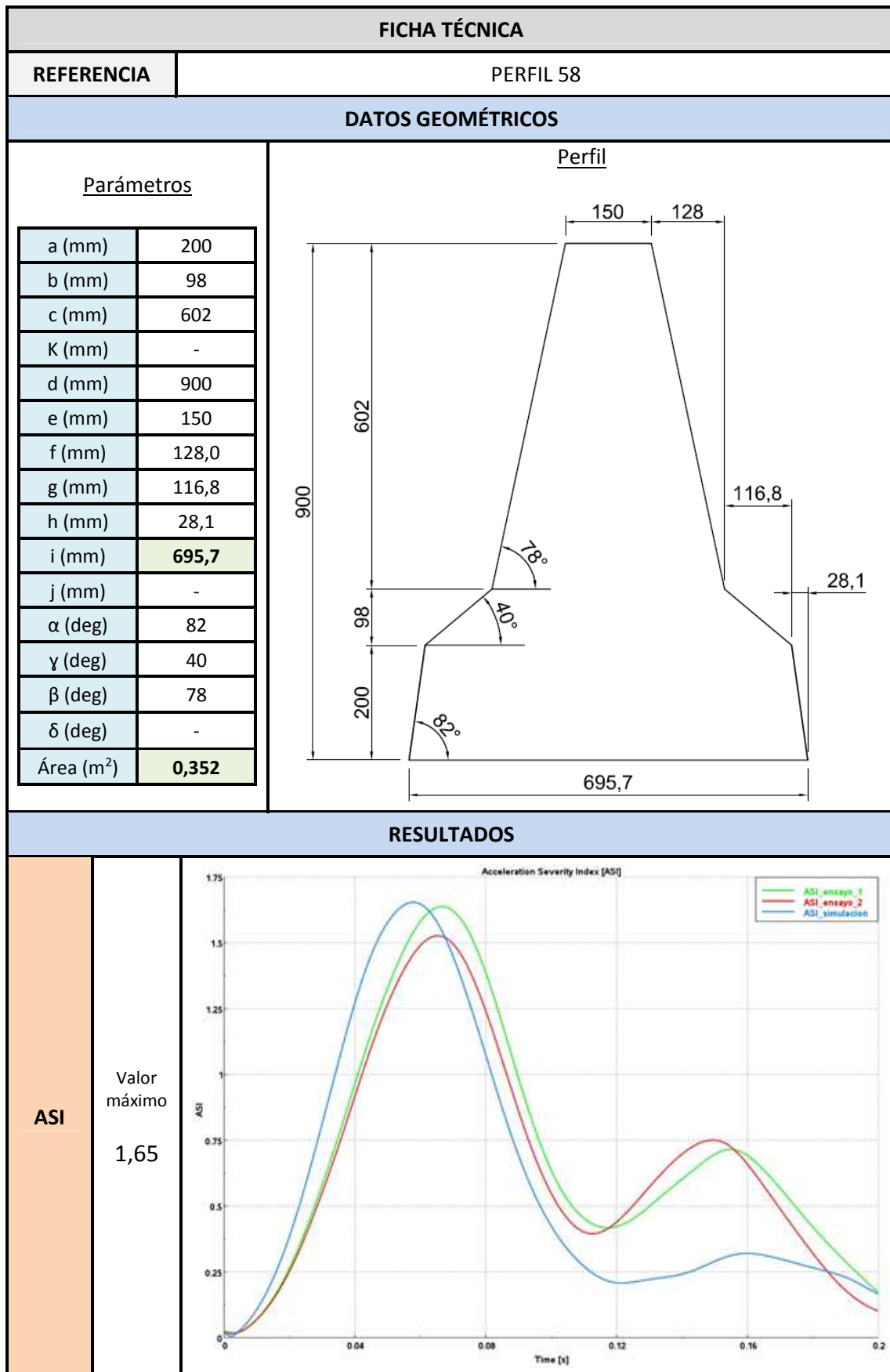




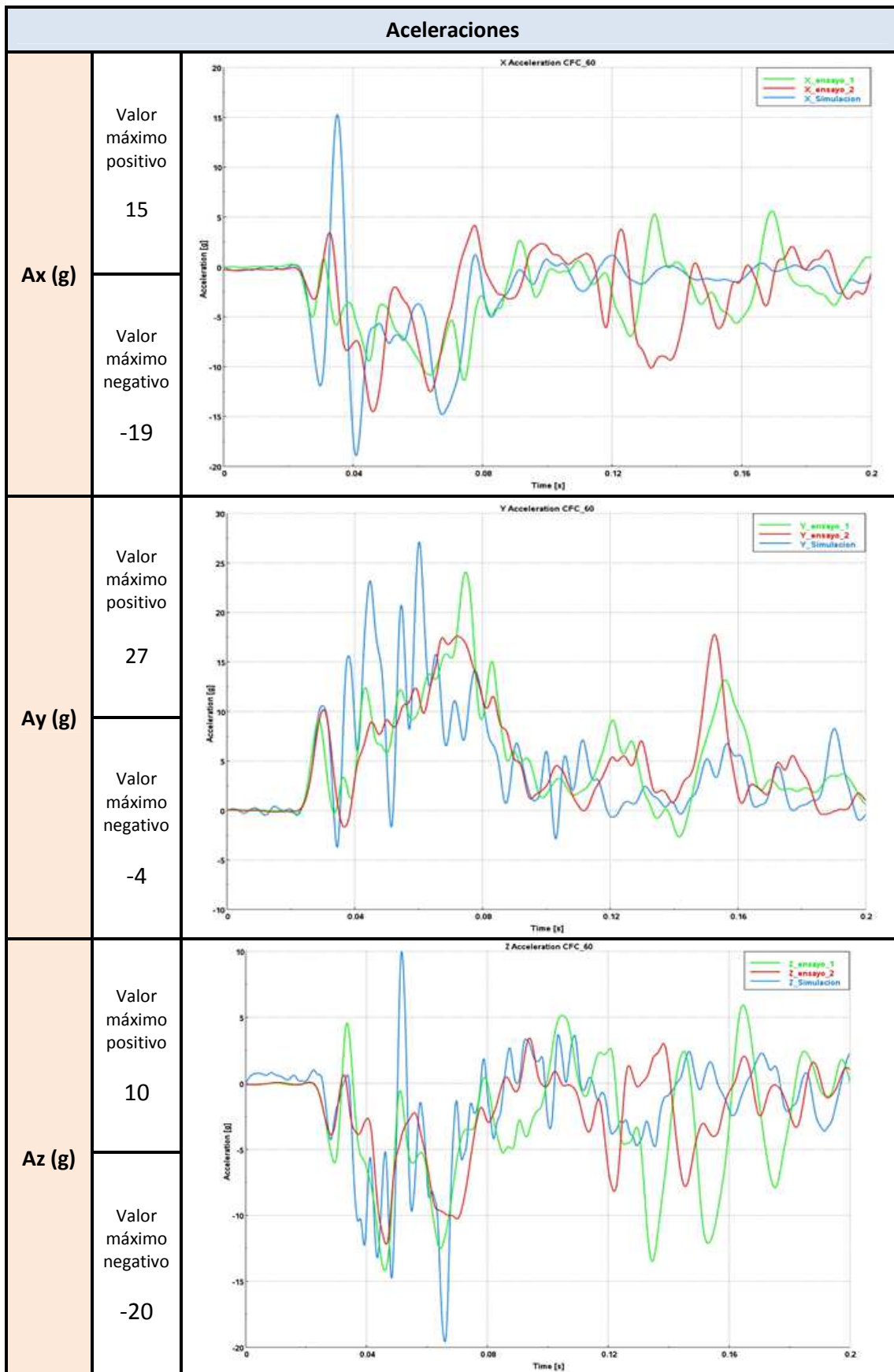
Aceleraciones			
Ax (g)	Valor máximo positivo	15	
	Valor máximo negativo	-18	
Ay (g)	Valor máximo positivo	32	
	Valor máximo negativo	-4	
Az (g)	Valor máximo positivo	6	
	Valor máximo negativo	-17	

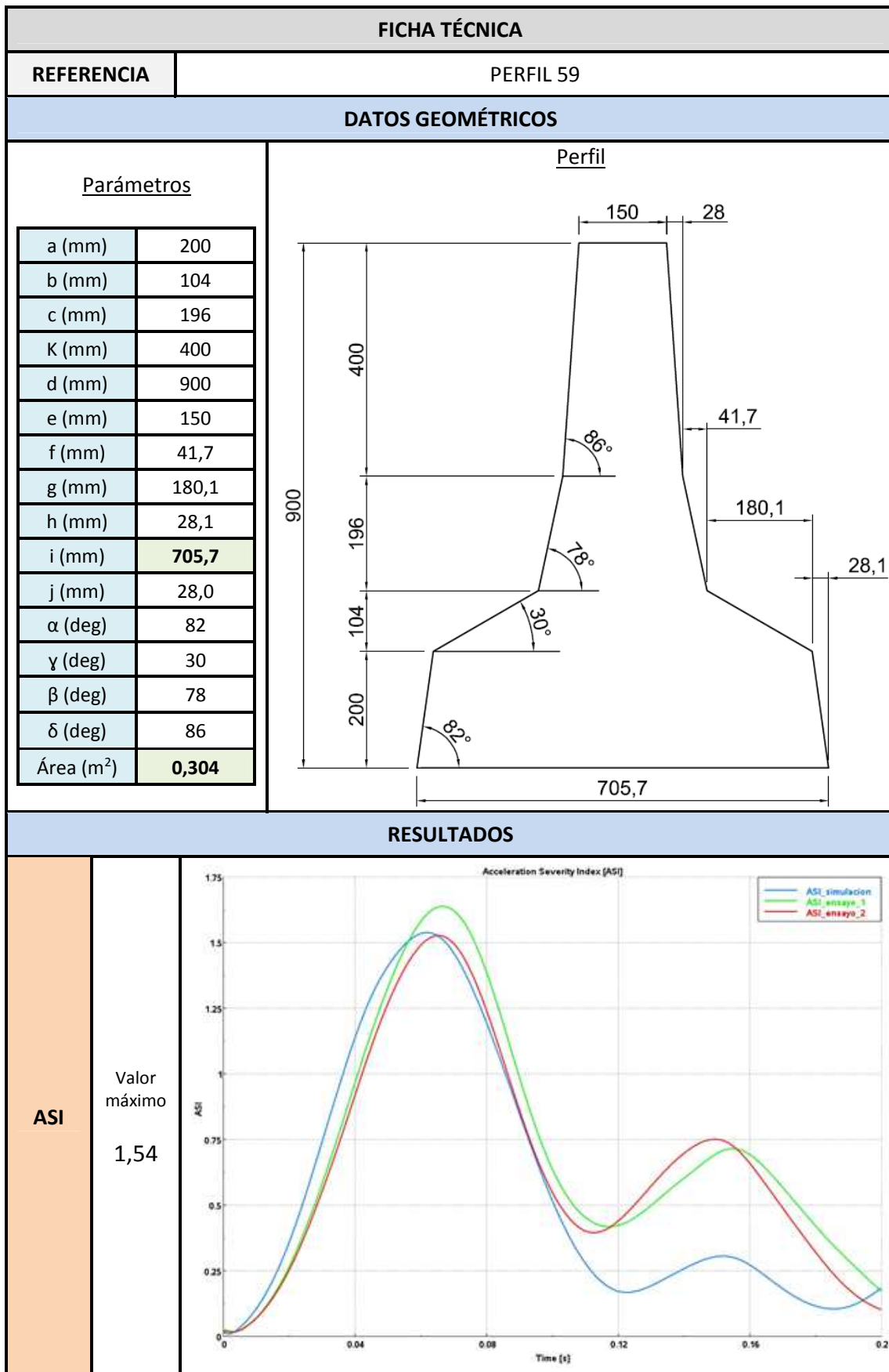


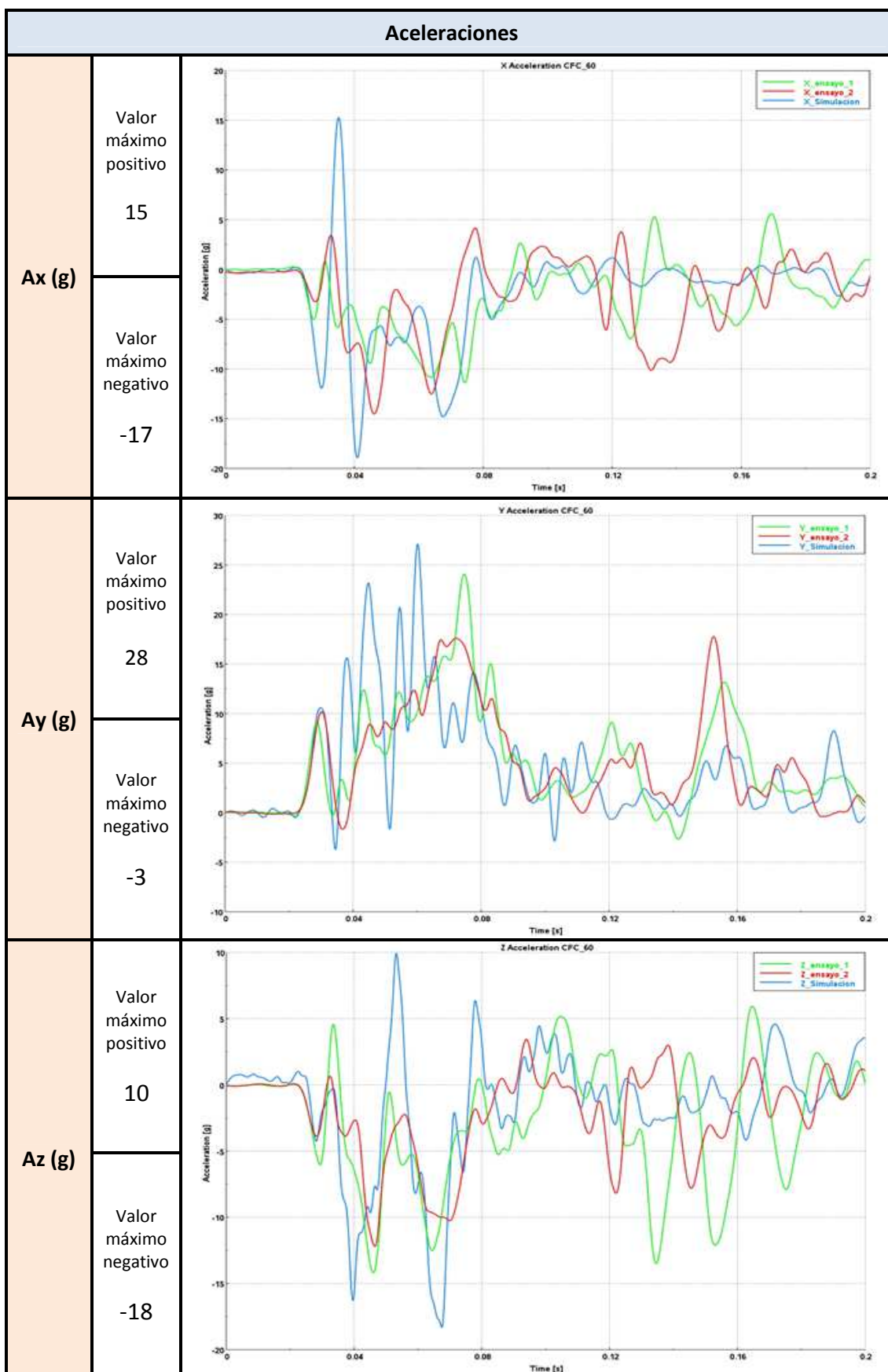


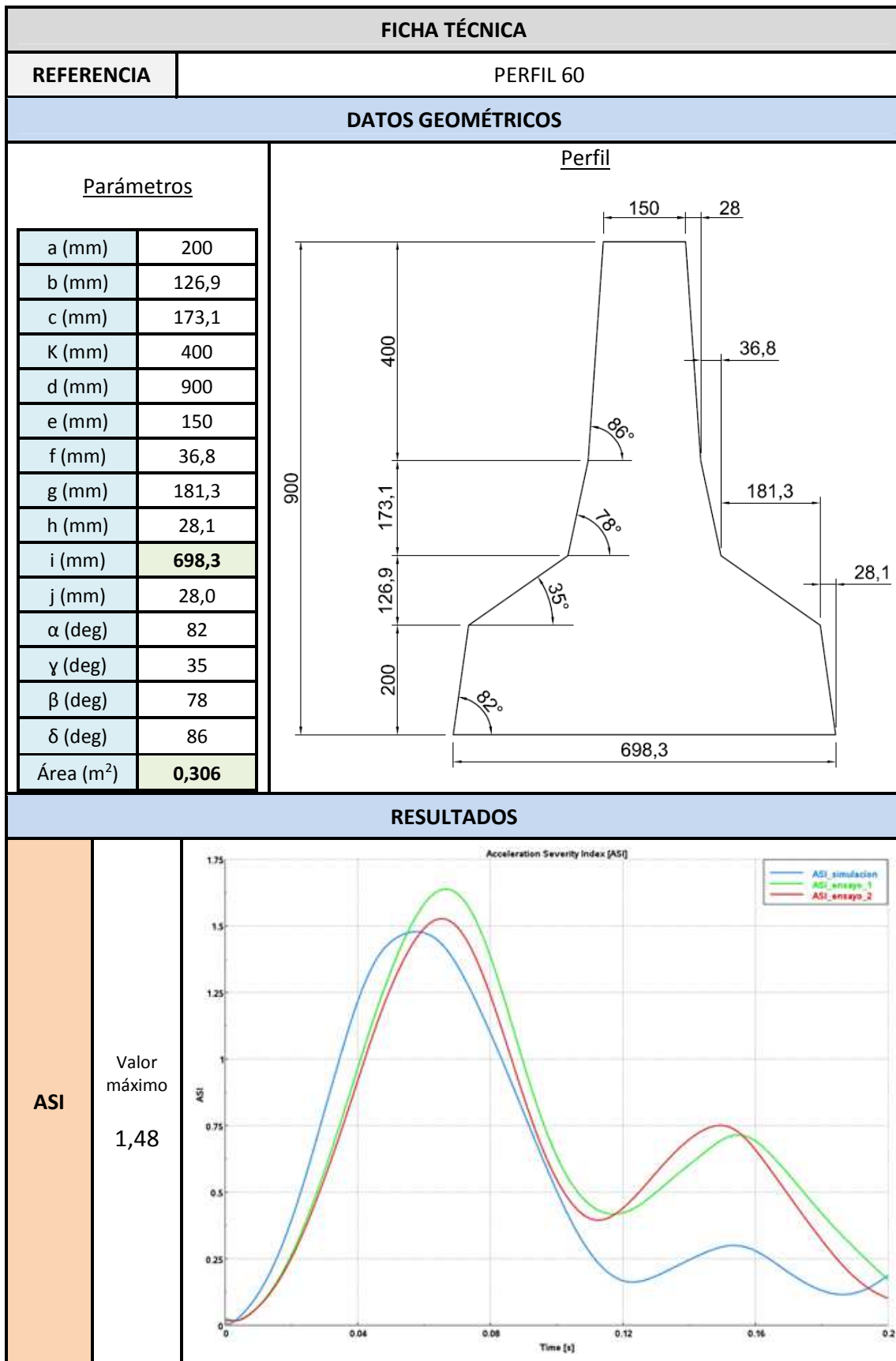




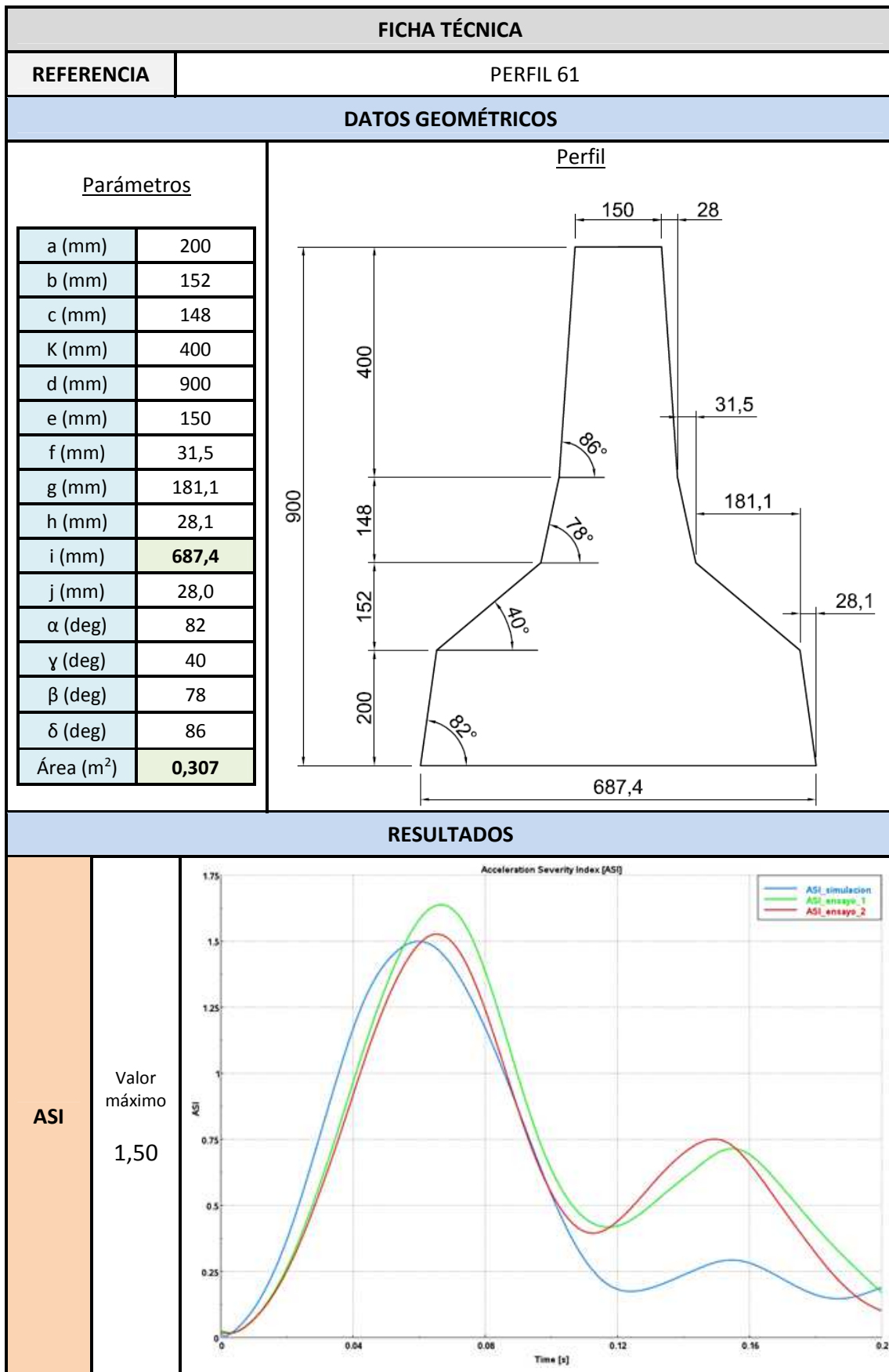




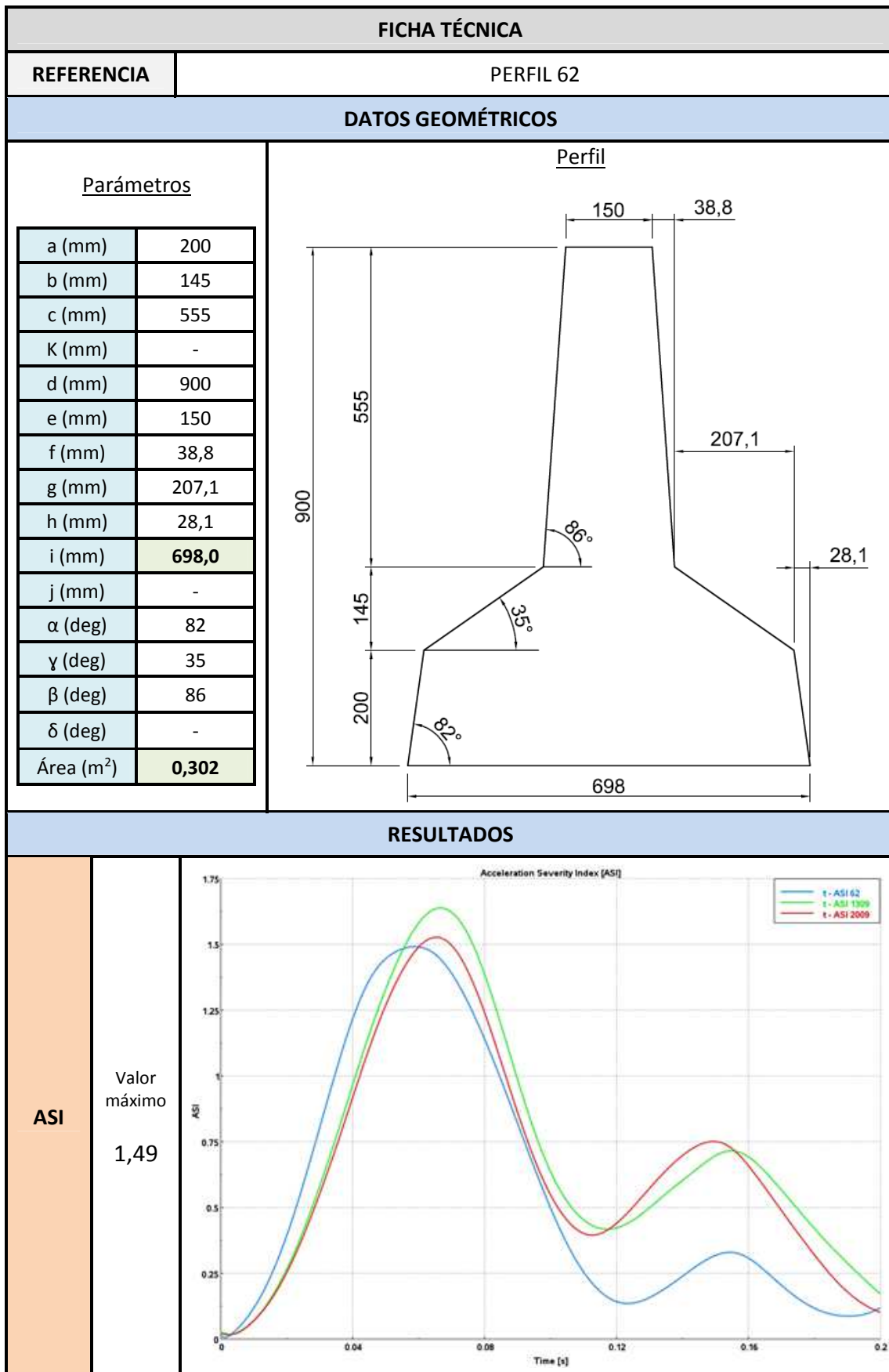




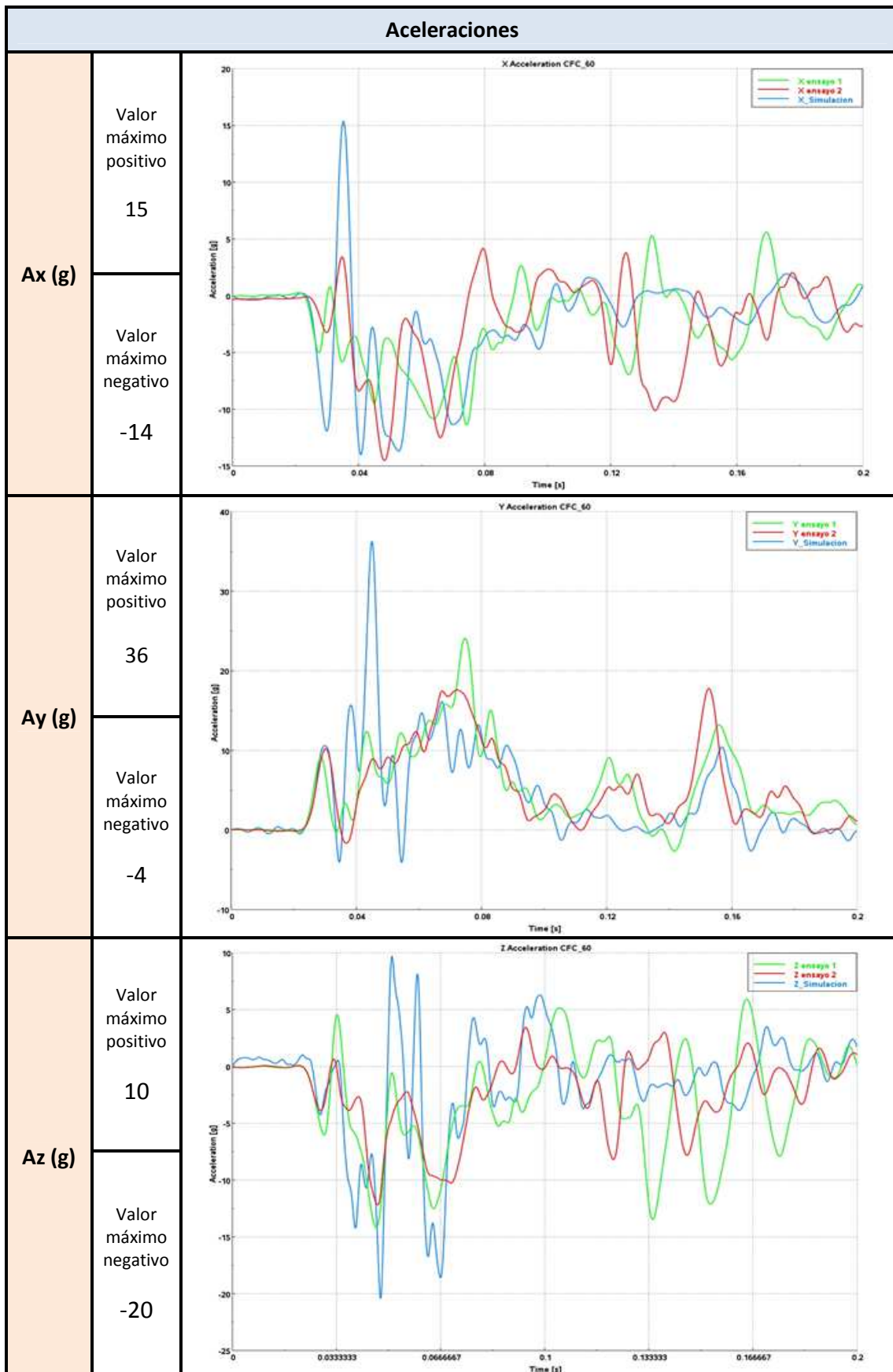
Aceleraciones		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  15	
	Valor máximo negativo  -15	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  36	
	Valor máximo negativo  -4	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  12	
	Valor máximo negativo  -25	

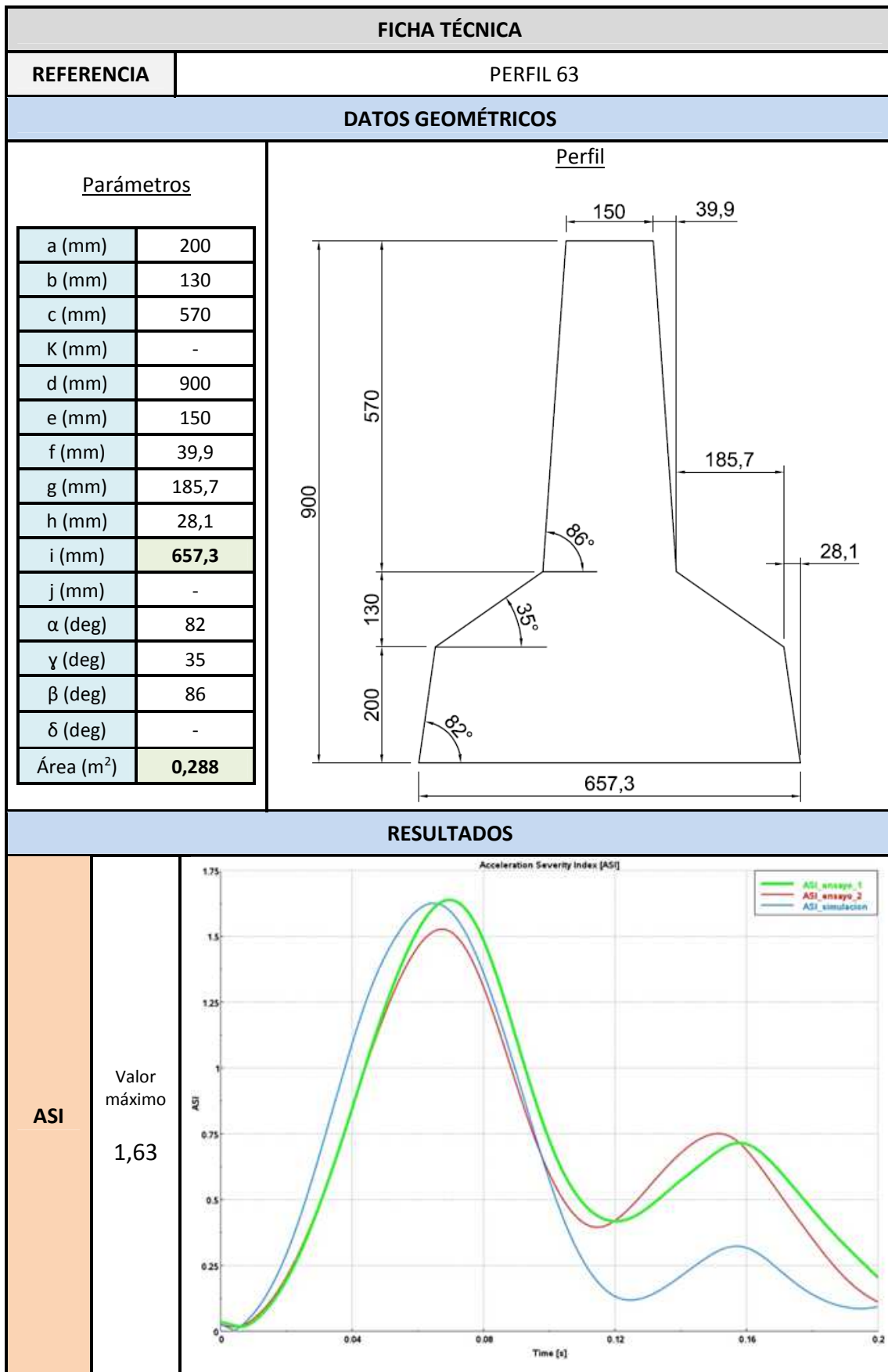


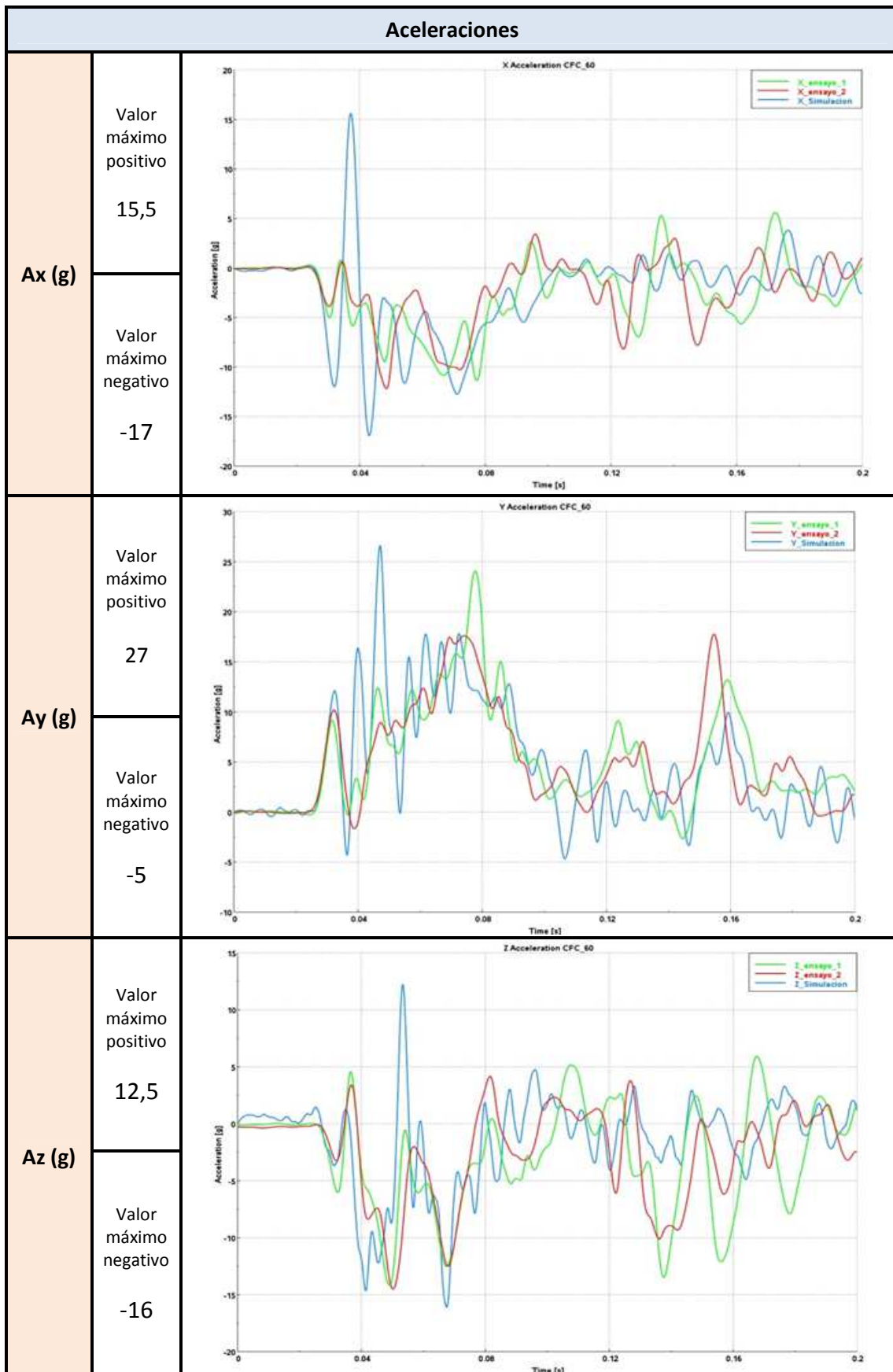
Aceleraciones		
Ax (g)	Valor máximo positivo 15	
	Valor máximo negativo -15	
Ay (g)	Valor máximo positivo 27	
	Valor máximo negativo -4	
Az (g)	Valor máximo positivo 12	
	Valor máximo negativo -25	

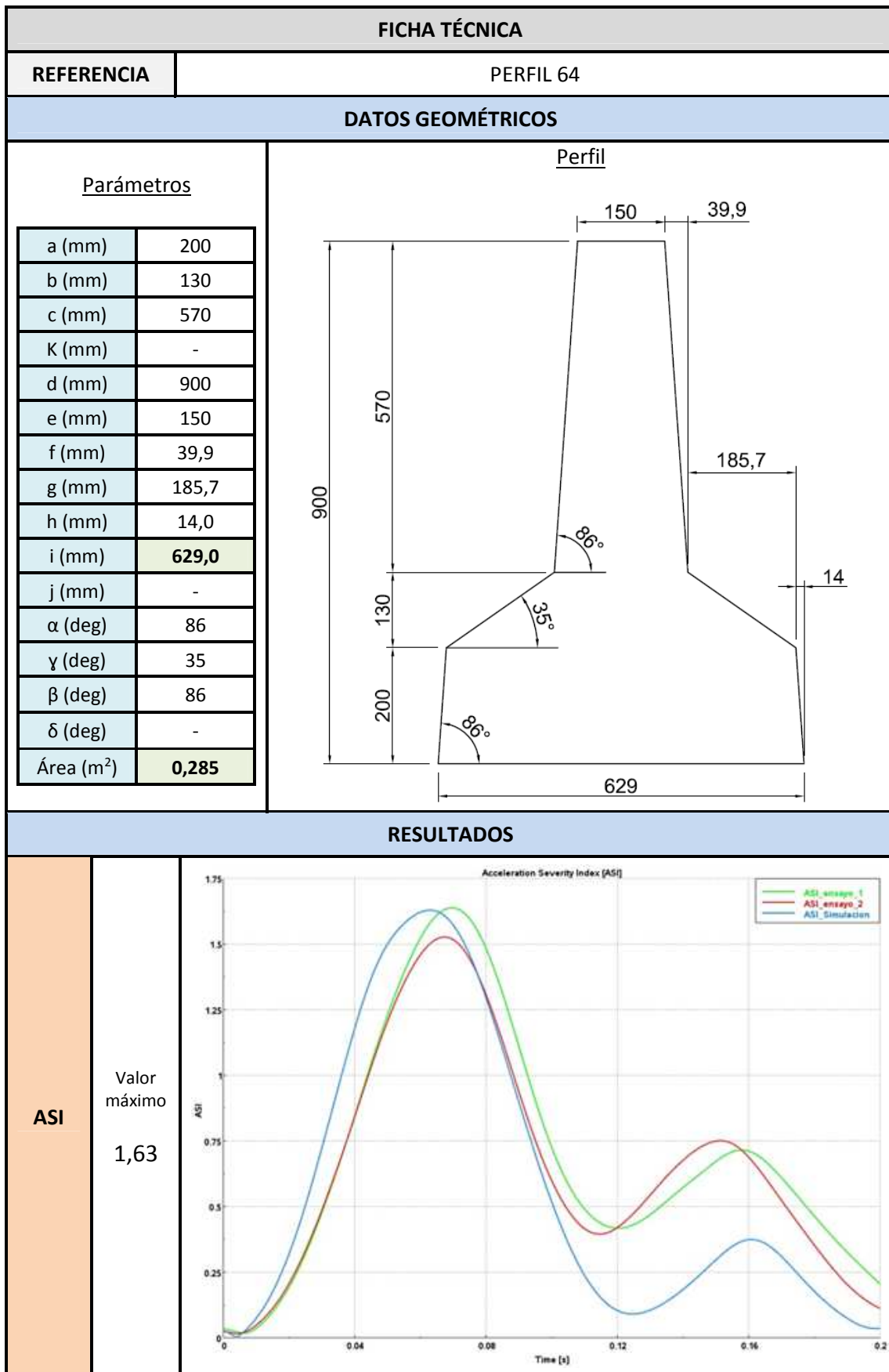




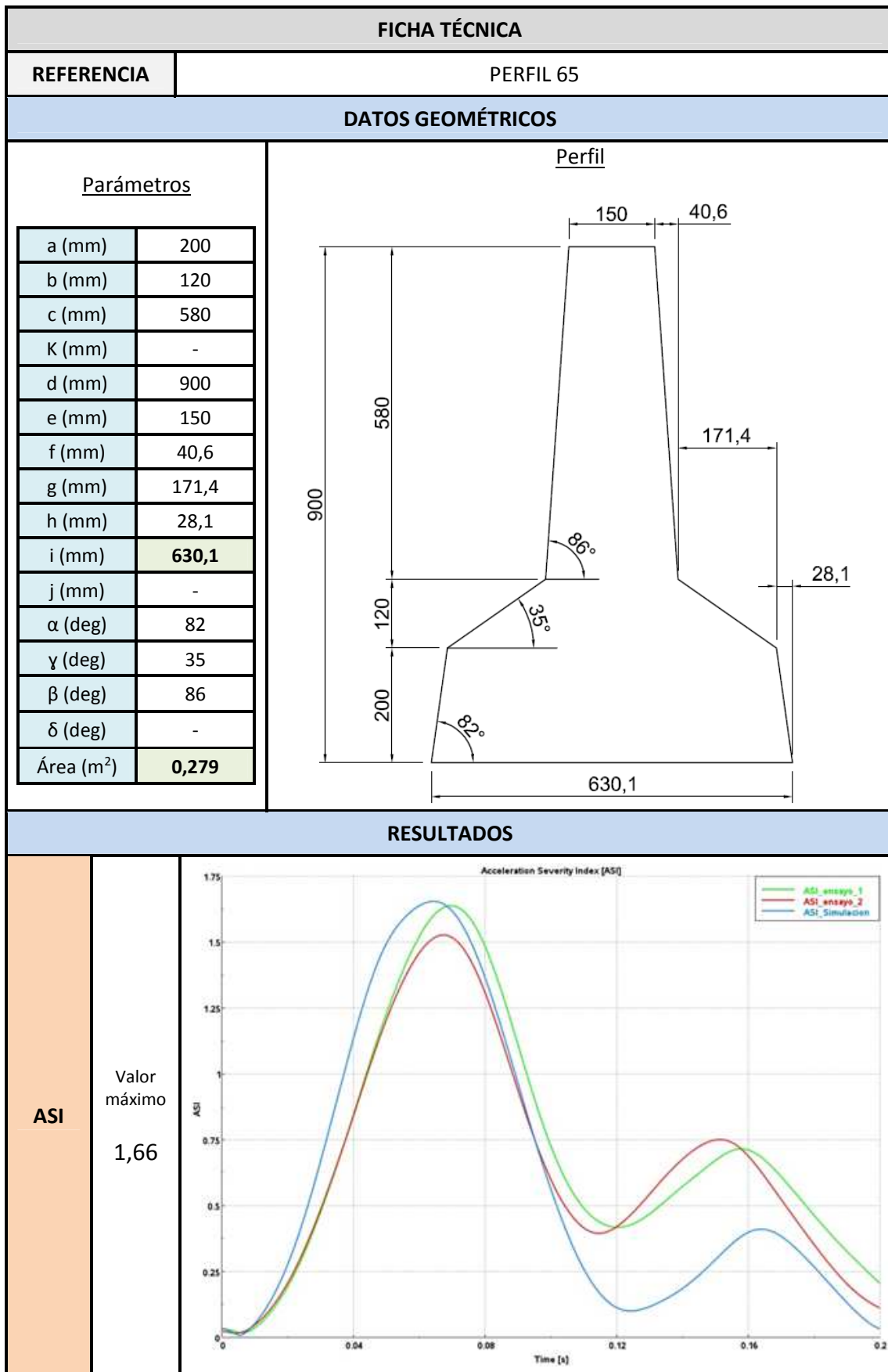


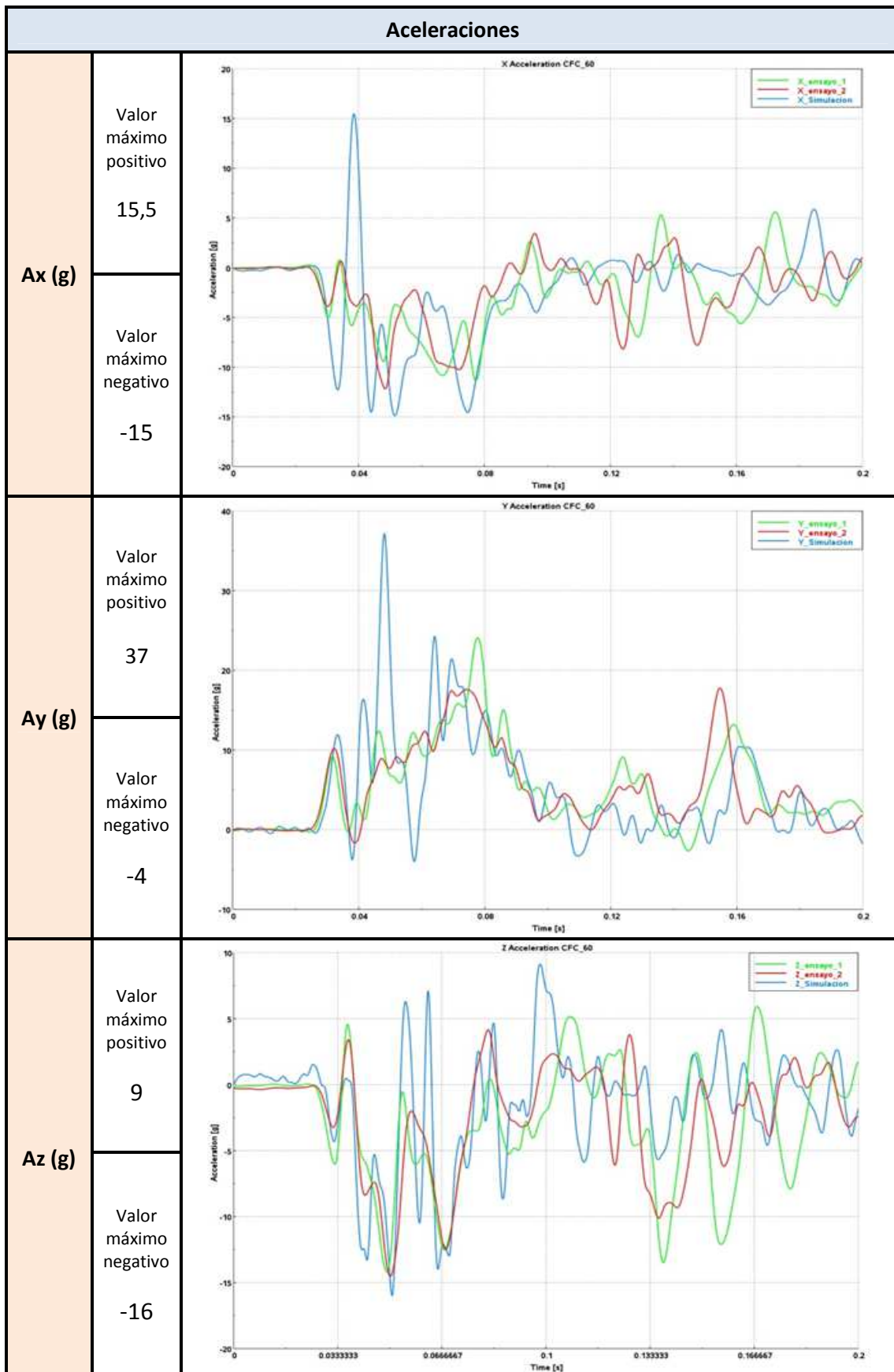


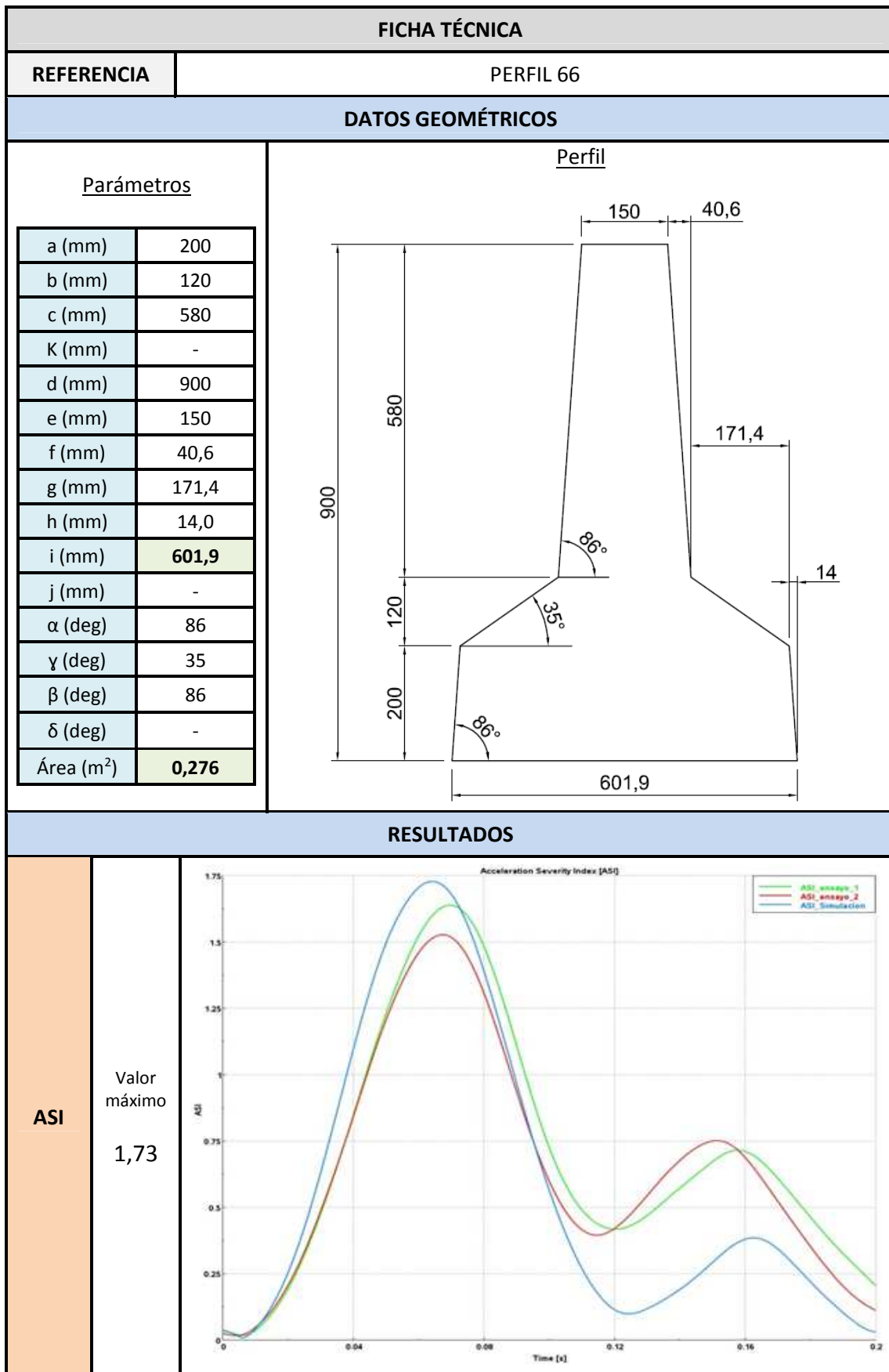




<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  15	
	Valor máximo negativo  -15	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  40	
	Valor máximo negativo  -5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  11,5	
	Valor máximo negativo  -19	

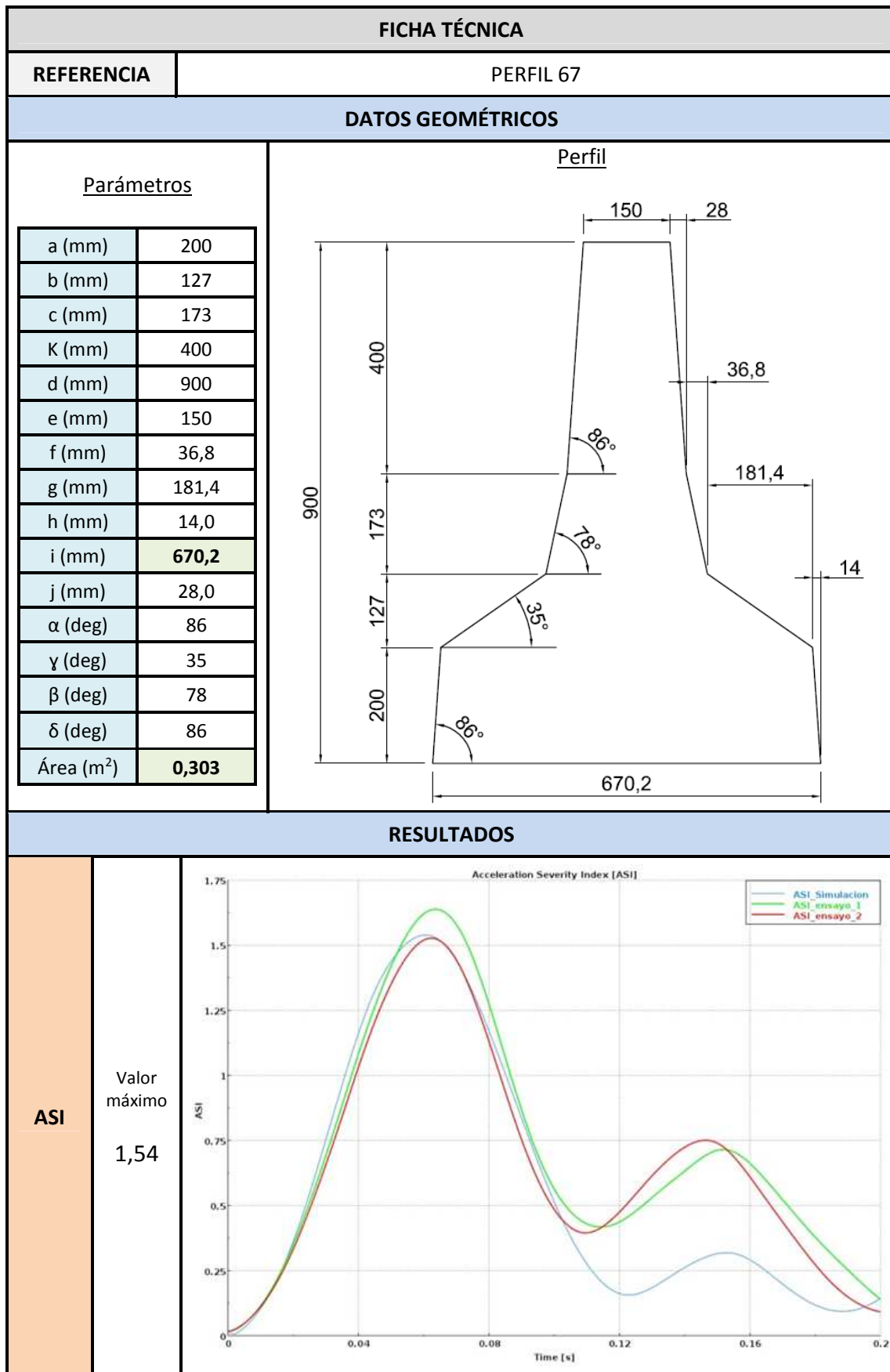


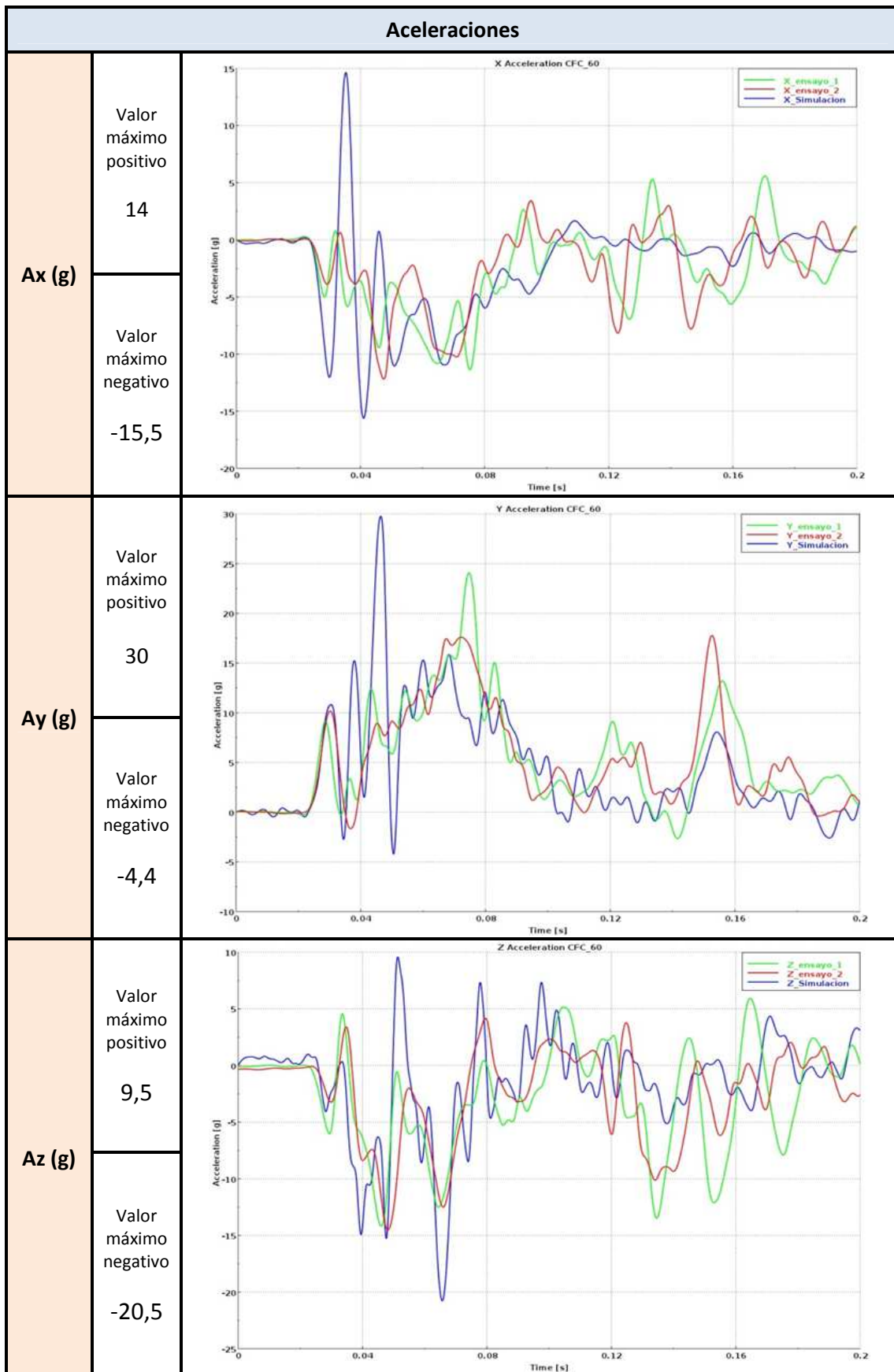


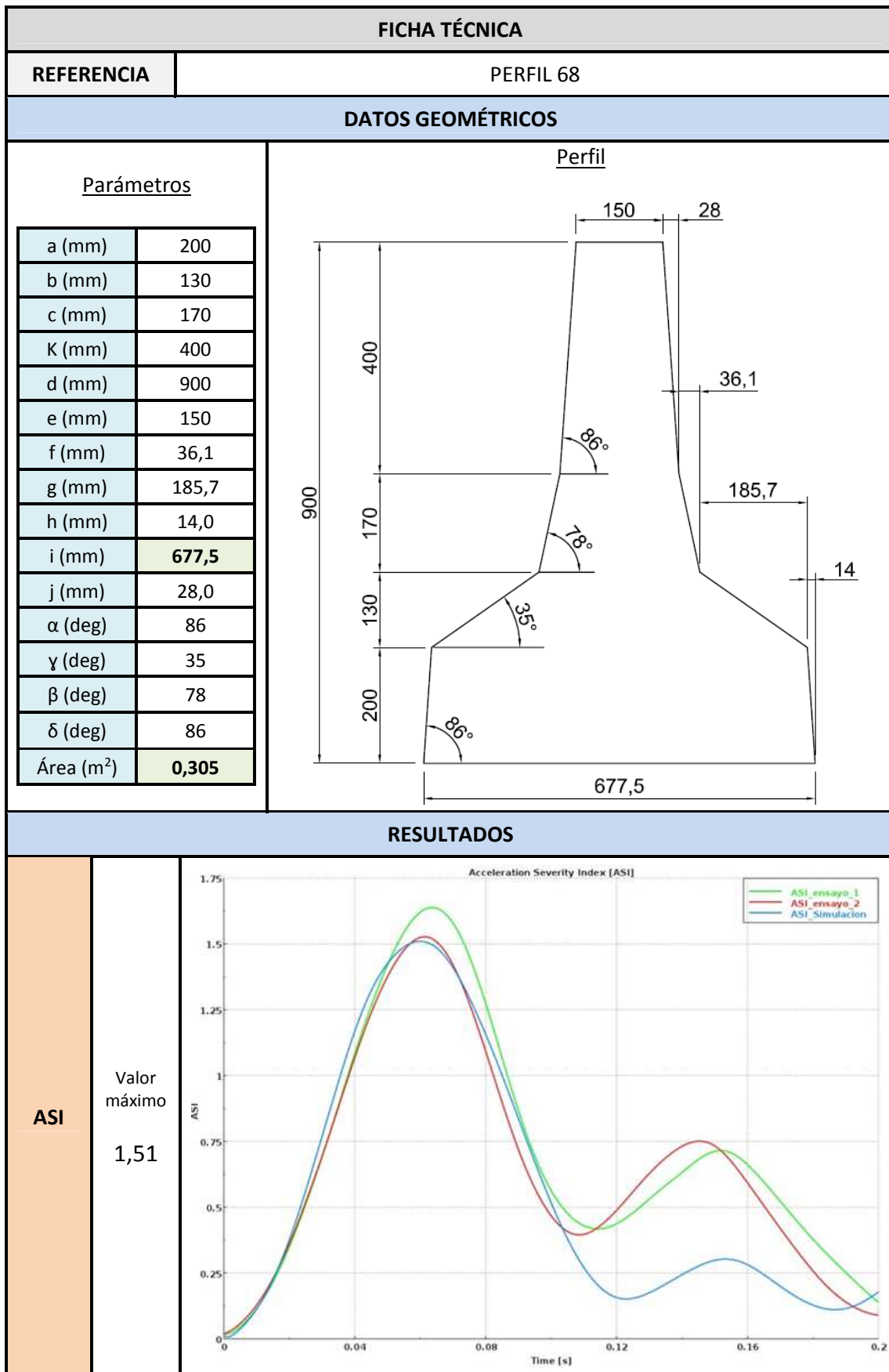


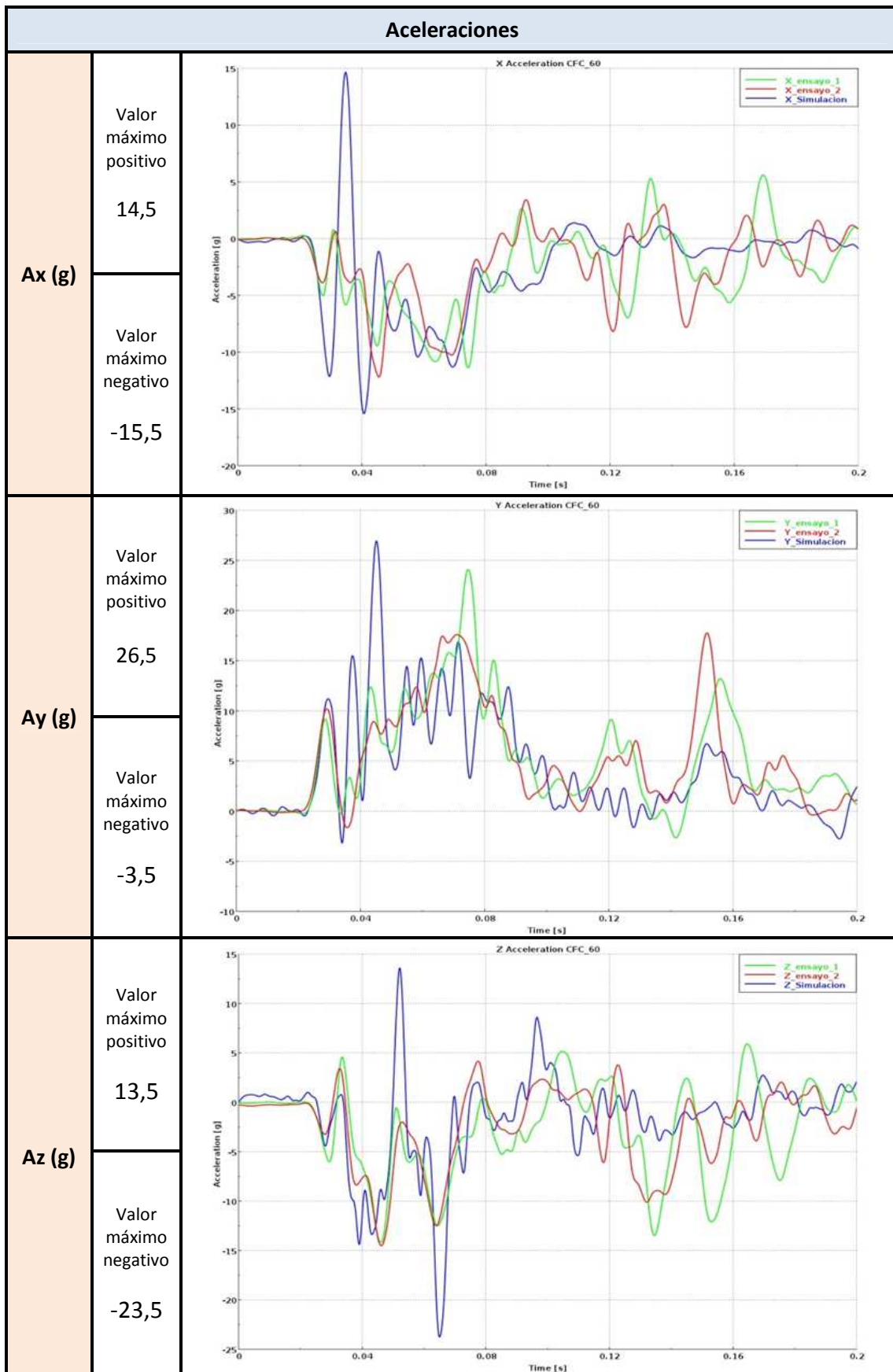


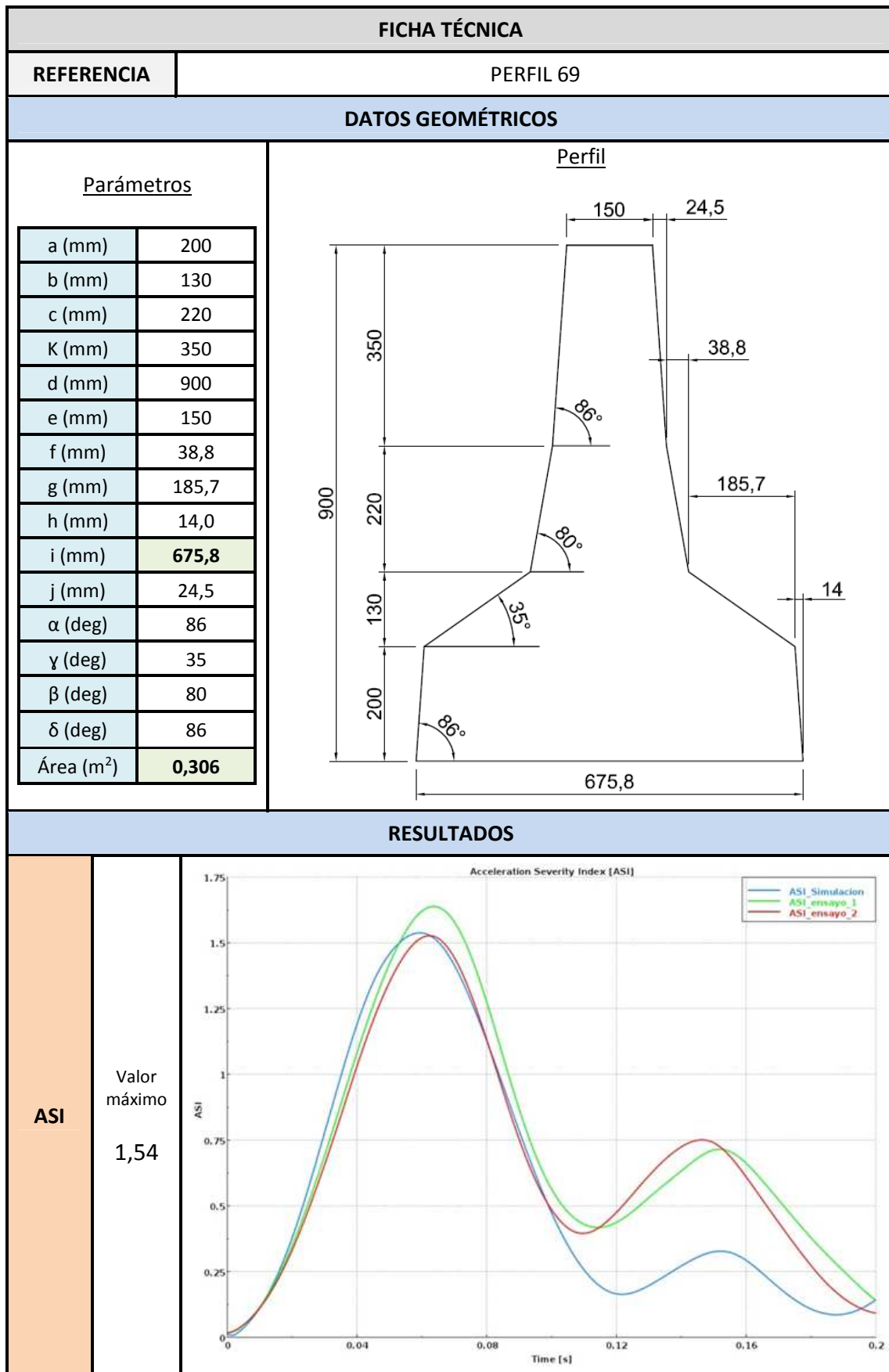
Aceleraciones			
Ax (g)	Valor máximo positivo	14,5	
	Valor máximo negativo	-16	
Ay (g)	Valor máximo positivo	30	
	Valor máximo negativo	-2,5	
Az (g)	Valor máximo positivo	7	
	Valor máximo negativo	-17	

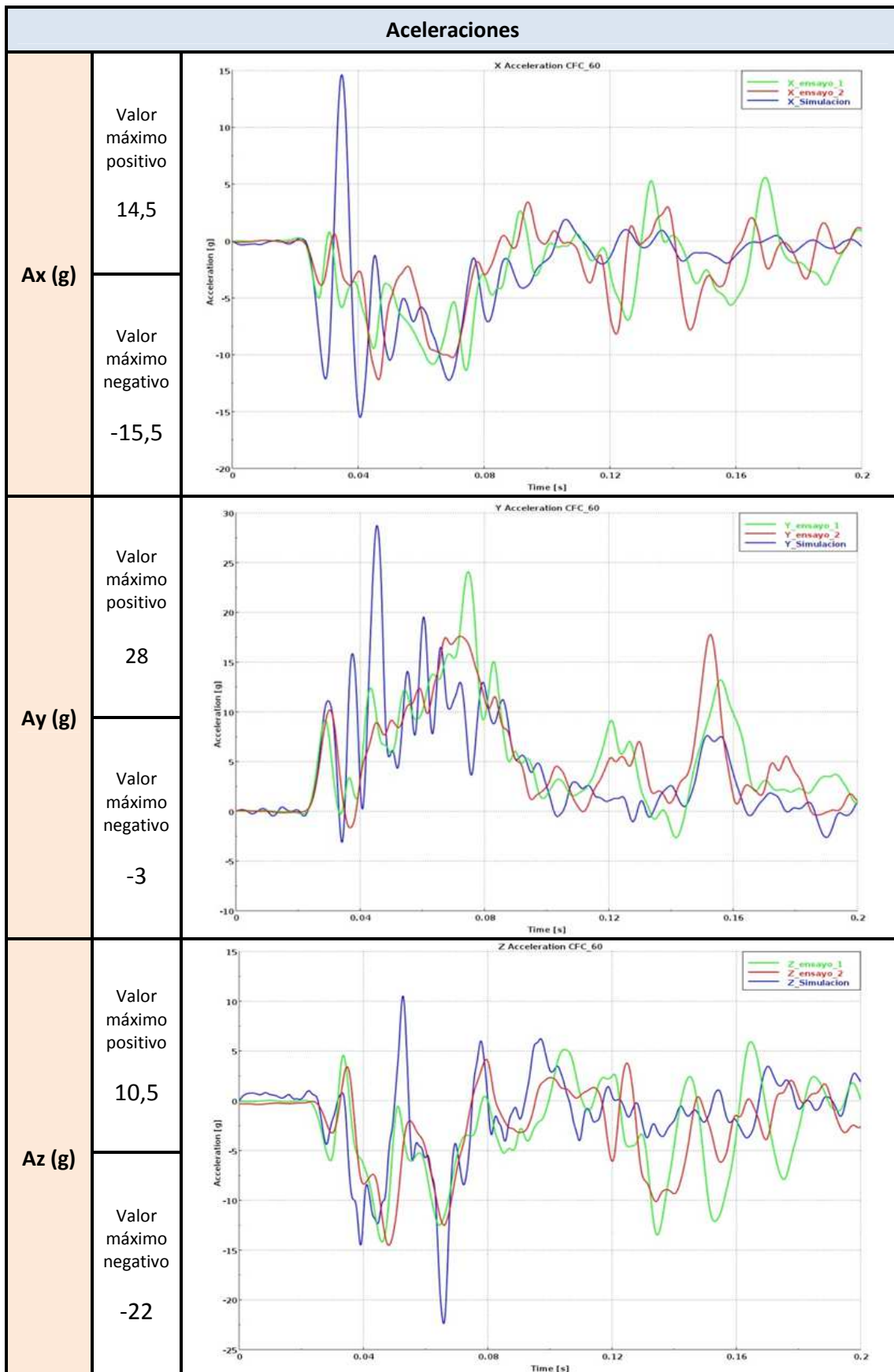


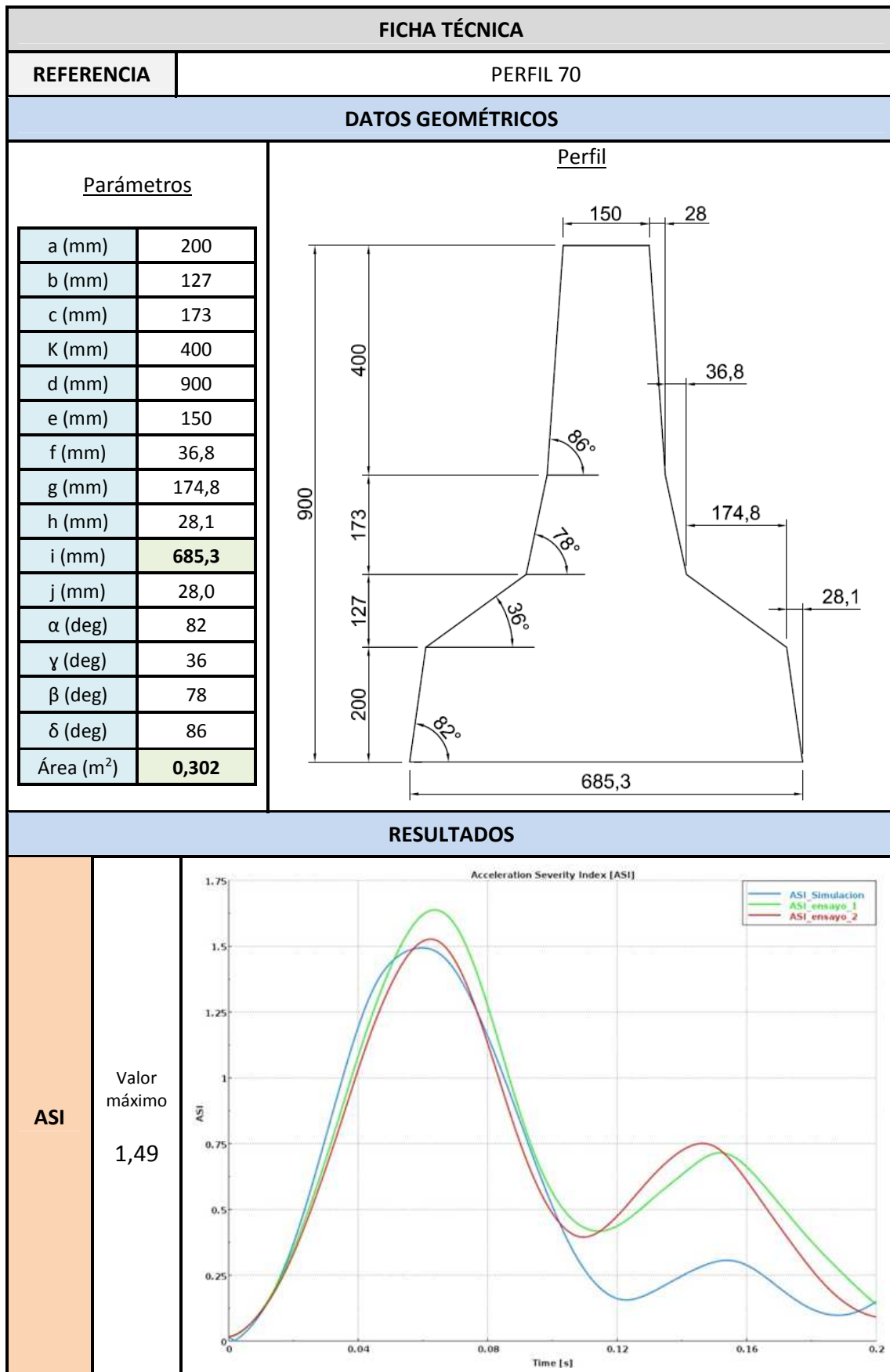




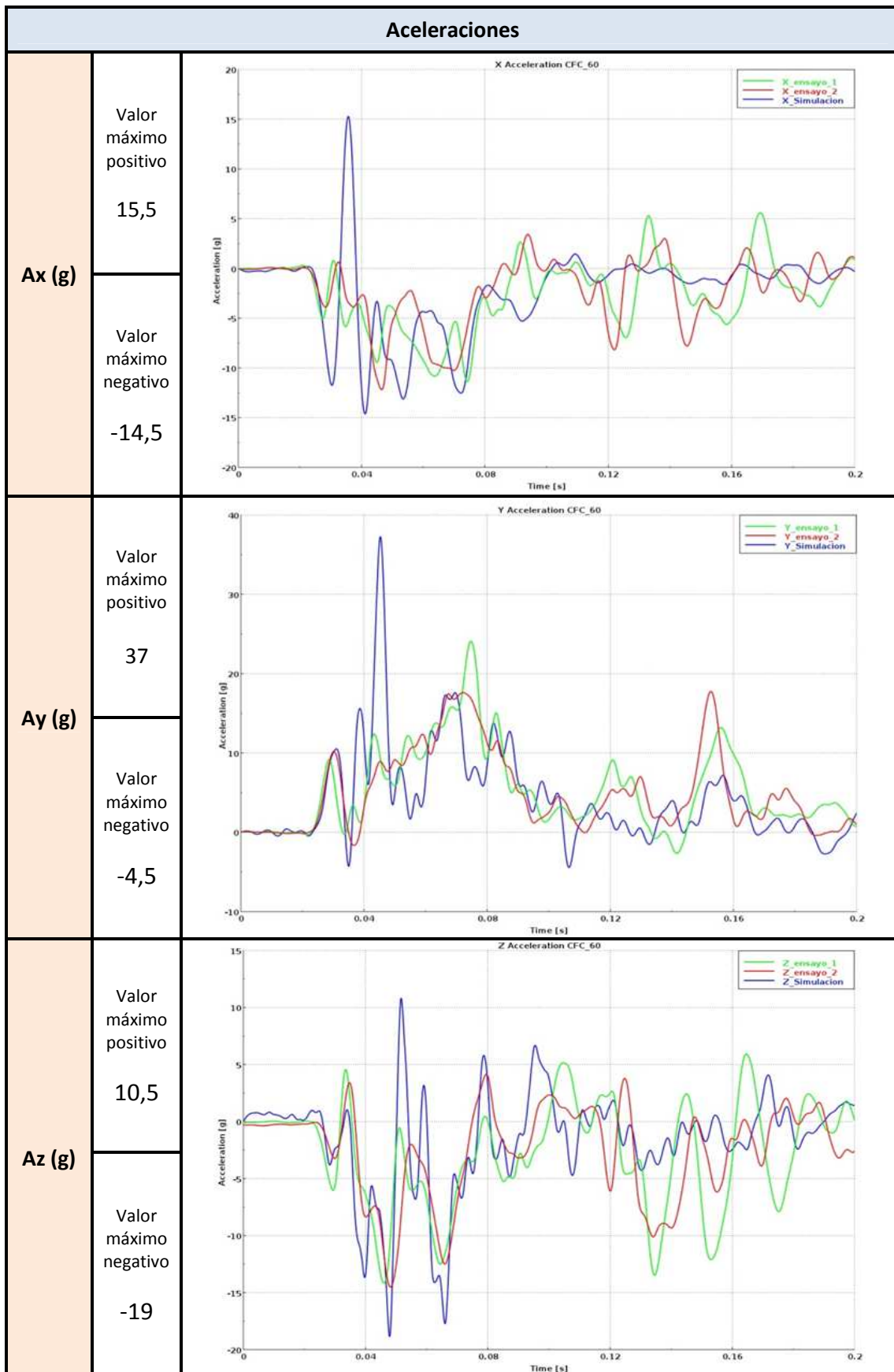


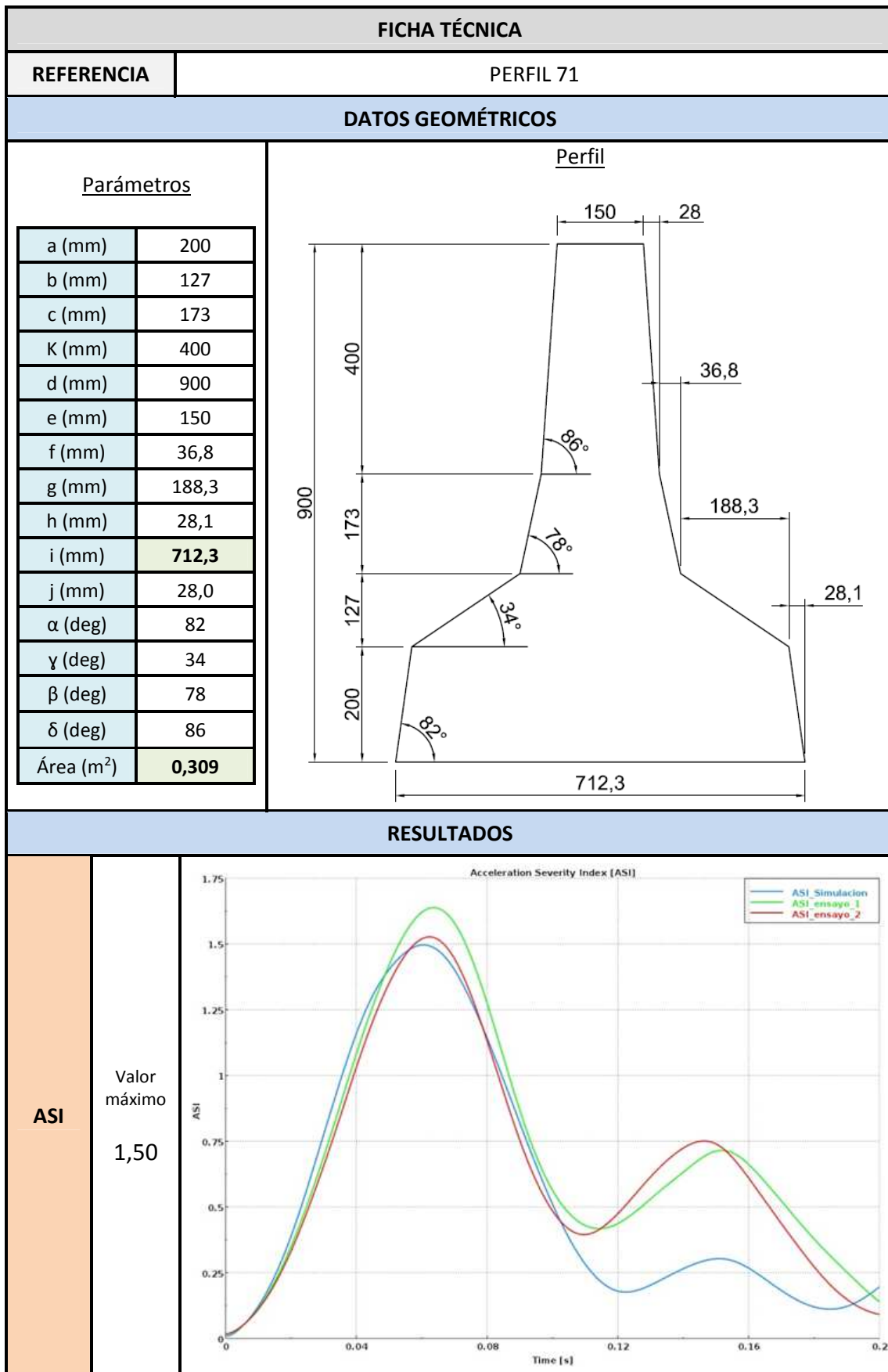


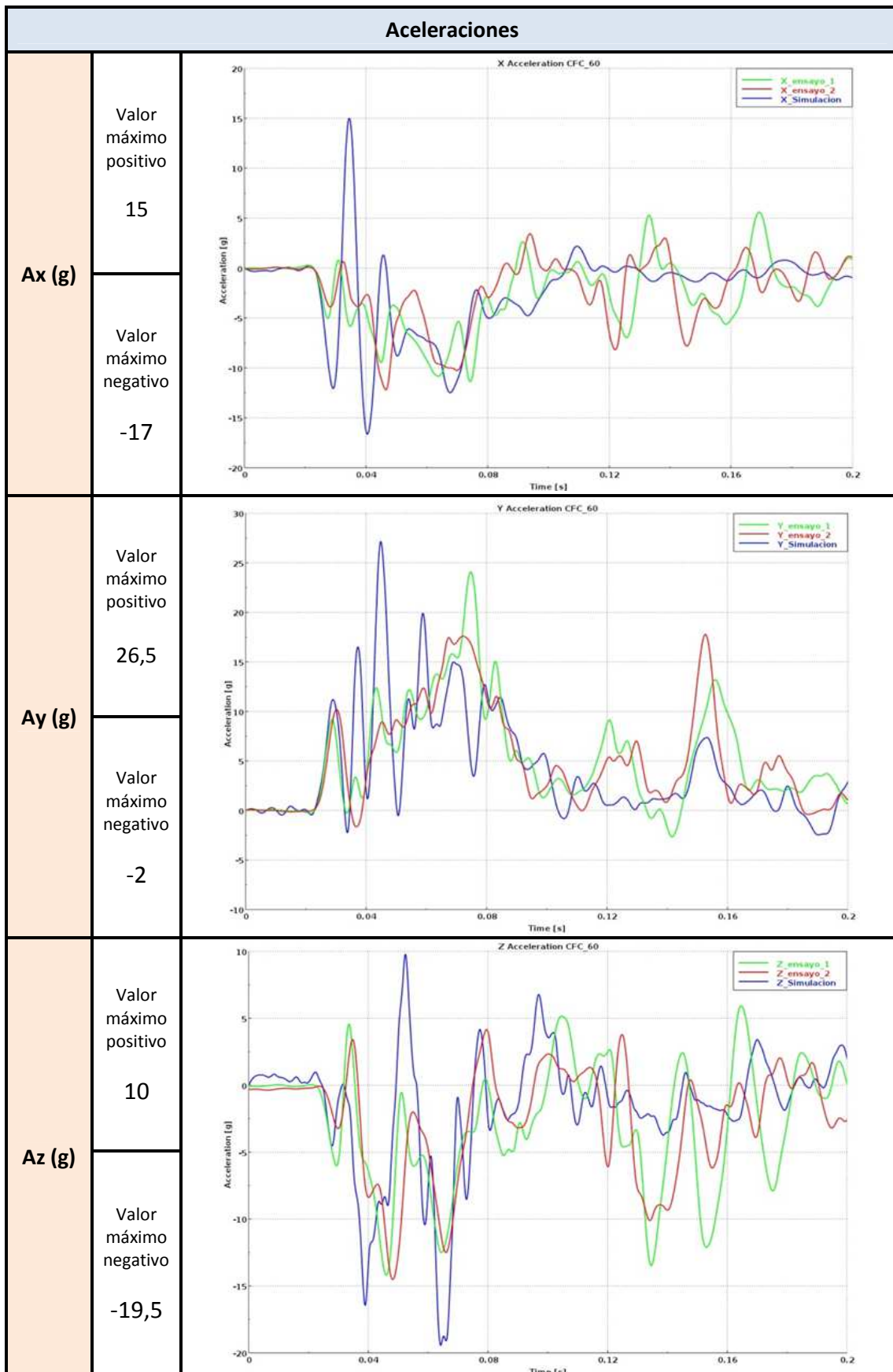




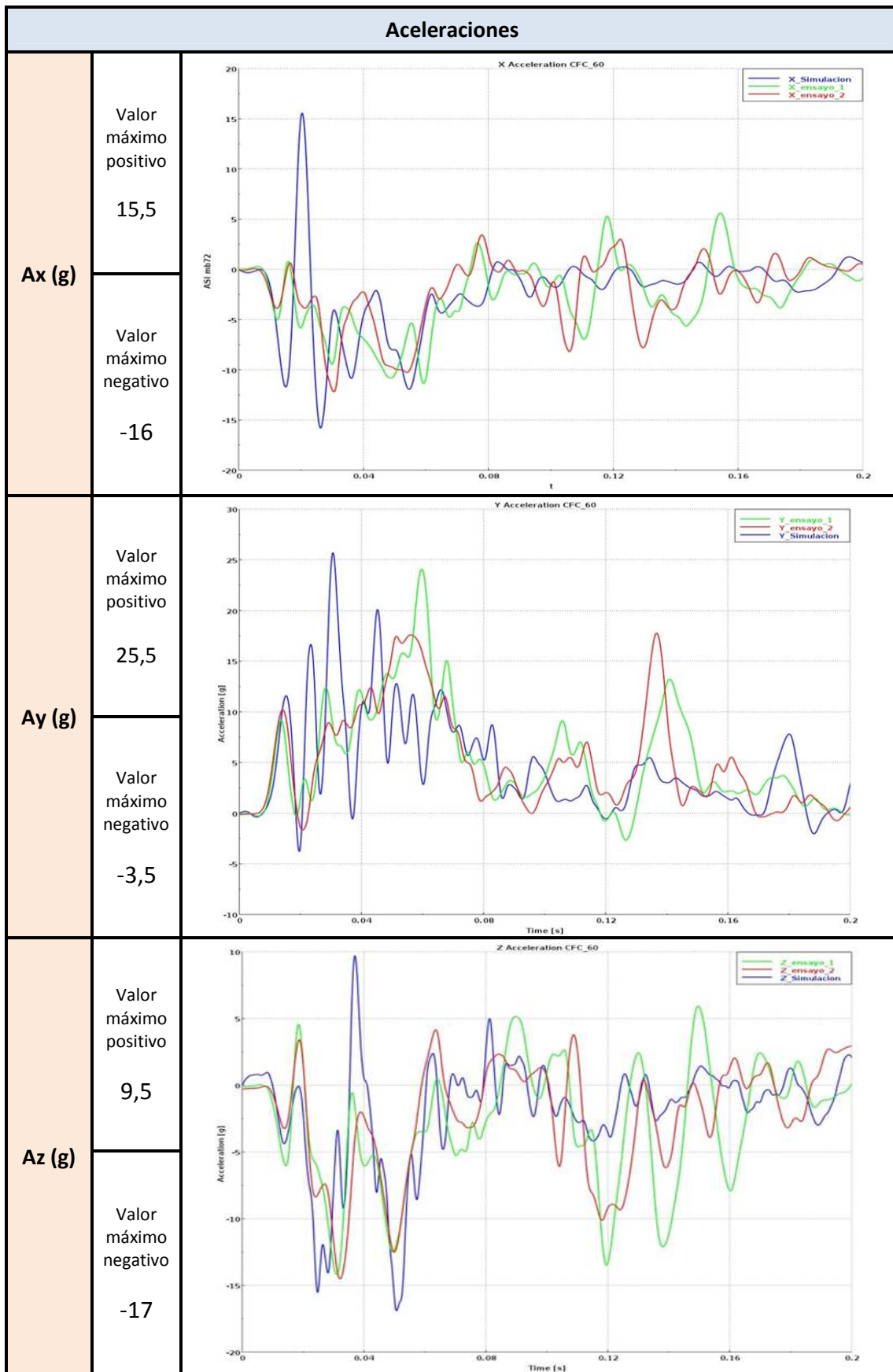


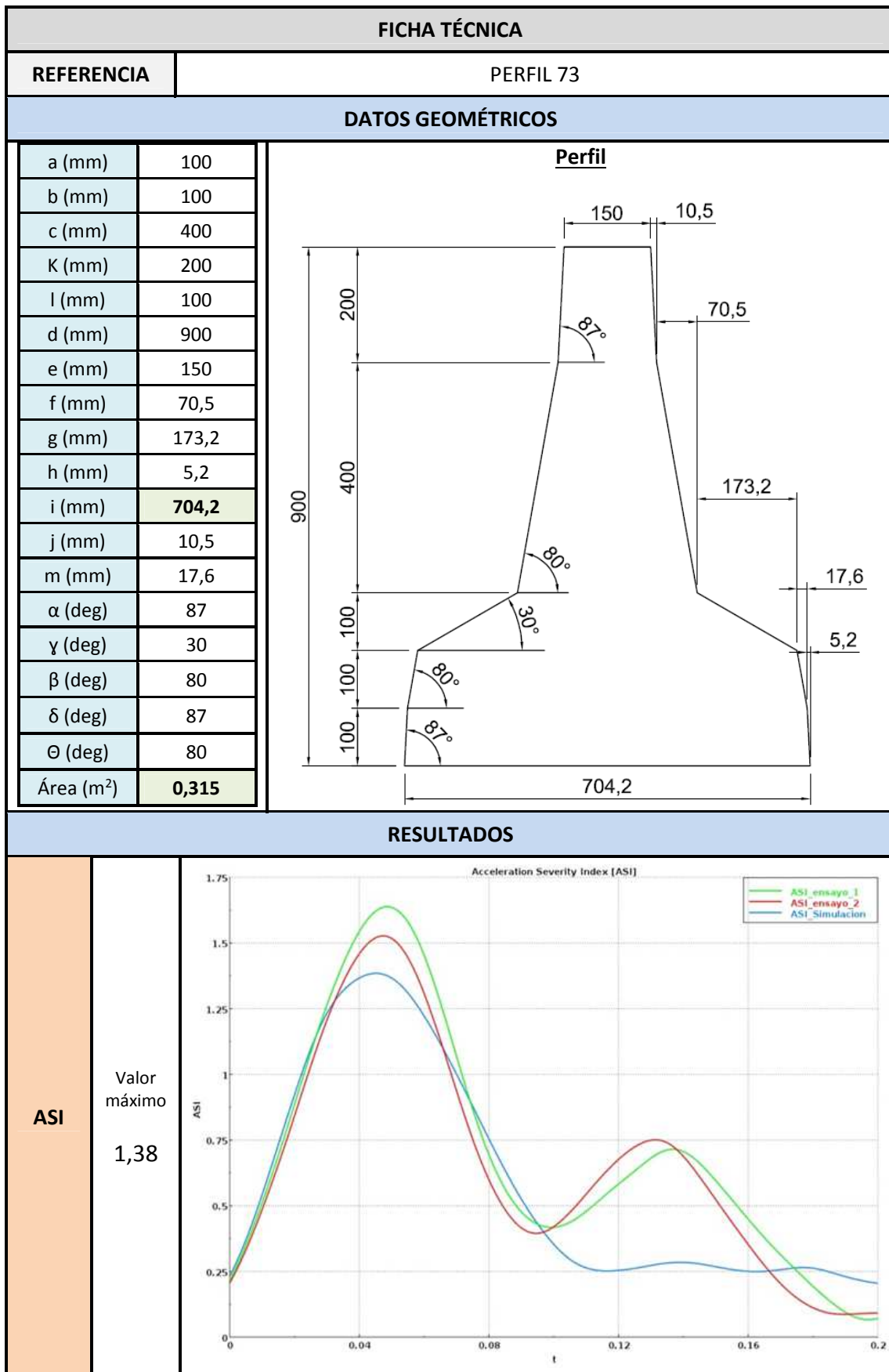






FICHA TÉCNICA	
REFERENCIA	PERFIL 72
DATOS GEOMÉTRICOS	
a (mm)	150
b (mm)	100
c (mm)	450
K (mm)	150
l (mm)	50
d (mm)	900
e (mm)	150
f (mm)	79,4
g (mm)	173,2
h (mm)	2,6
i (mm)	<b>683,2</b>
j (mm)	2,6
m (mm)	8,8
$\alpha$ (deg)	89
$\gamma$ (deg)	30
$\beta$ (deg)	80
$\delta$ (deg)	89
$\theta$ (deg)	80
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,313</b>
<p style="text-align: center;">Perfil</p>	
RESULTADOS	
ASI	<p>Valor máximo</p> <p><b>1,41</b></p>



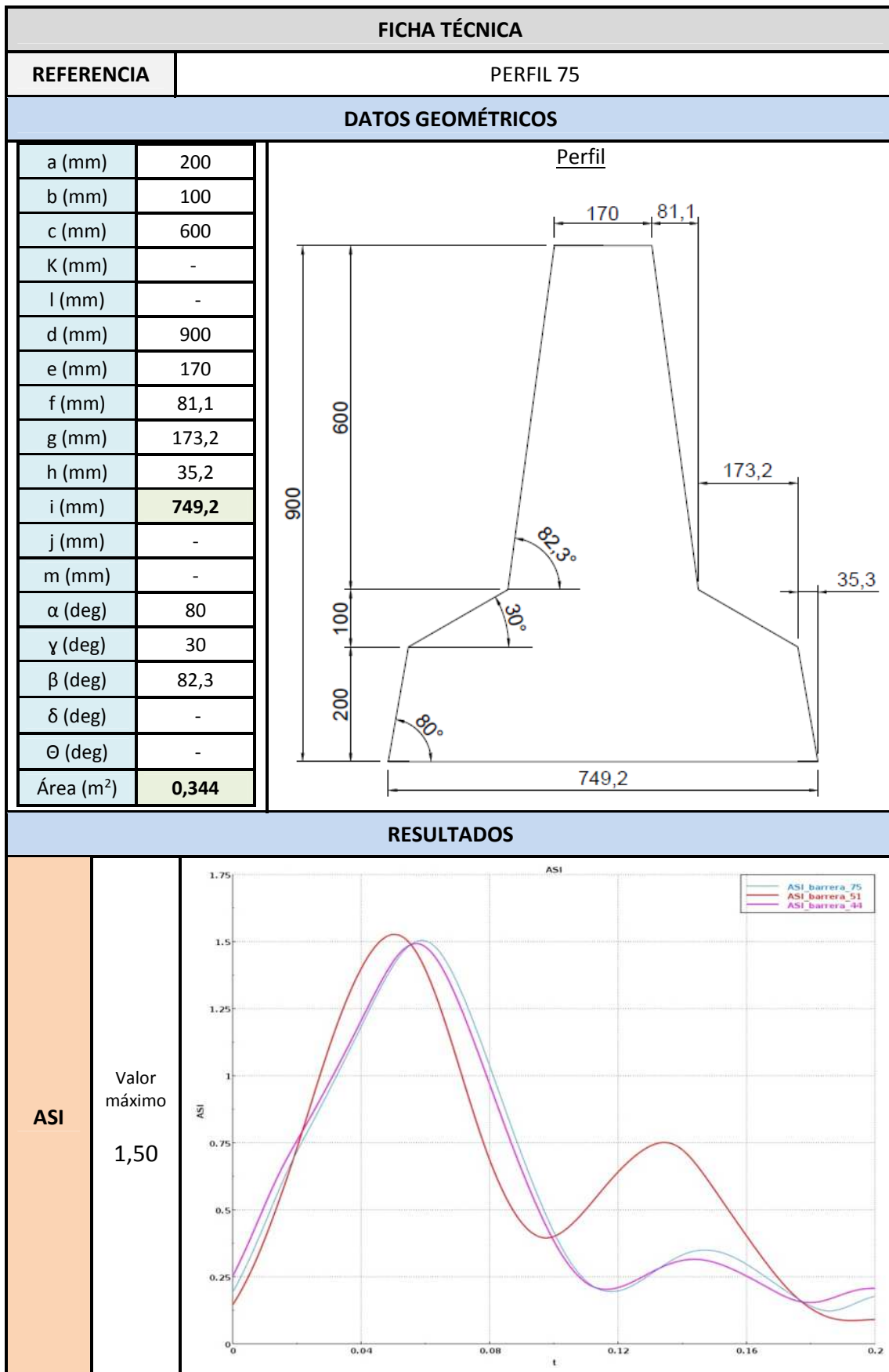


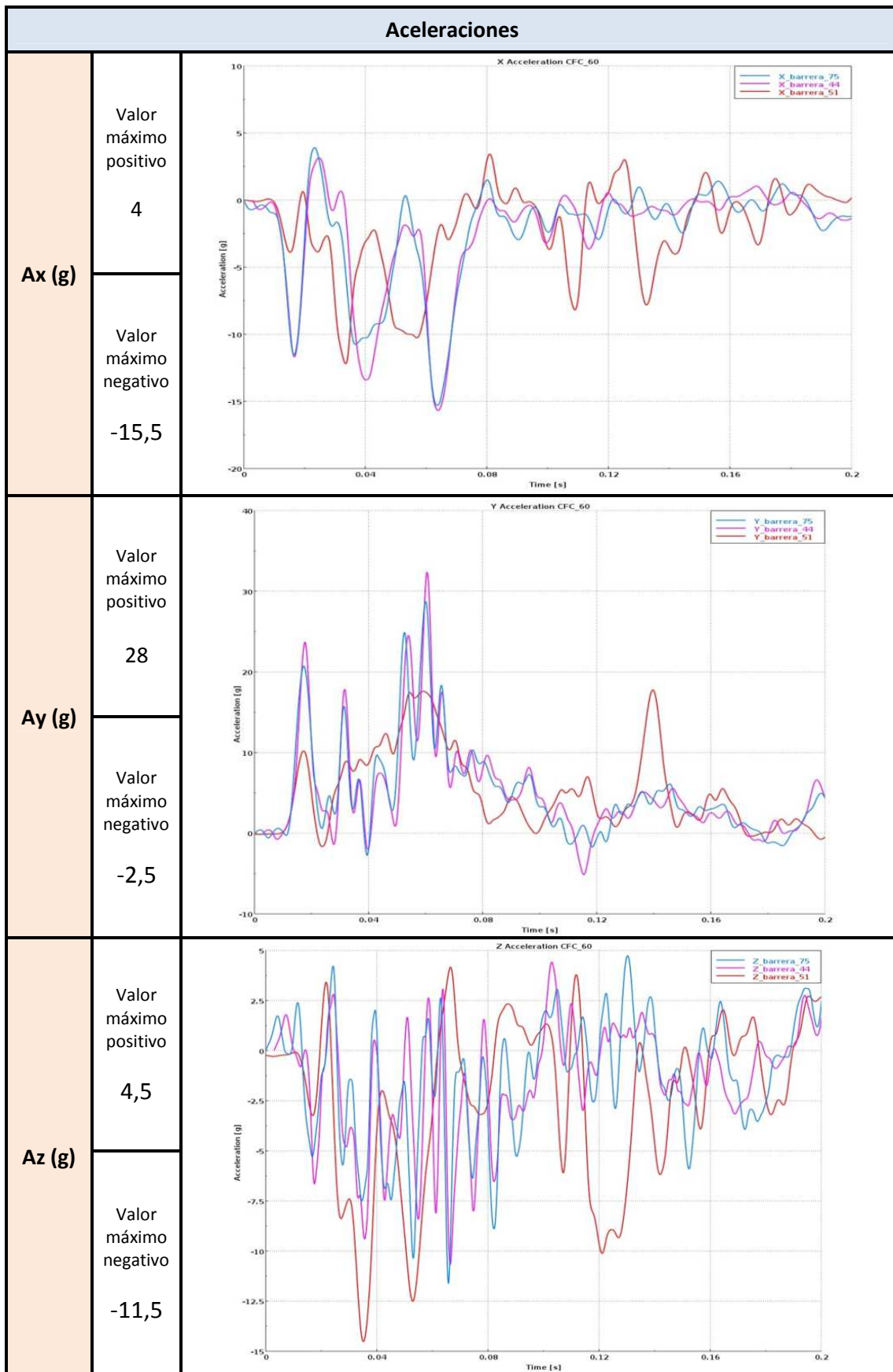
<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  15,5	
	Valor máximo negativo  -16	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  26,5	
	Valor máximo negativo  -4	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  10	
	Valor máximo negativo  -20,5	

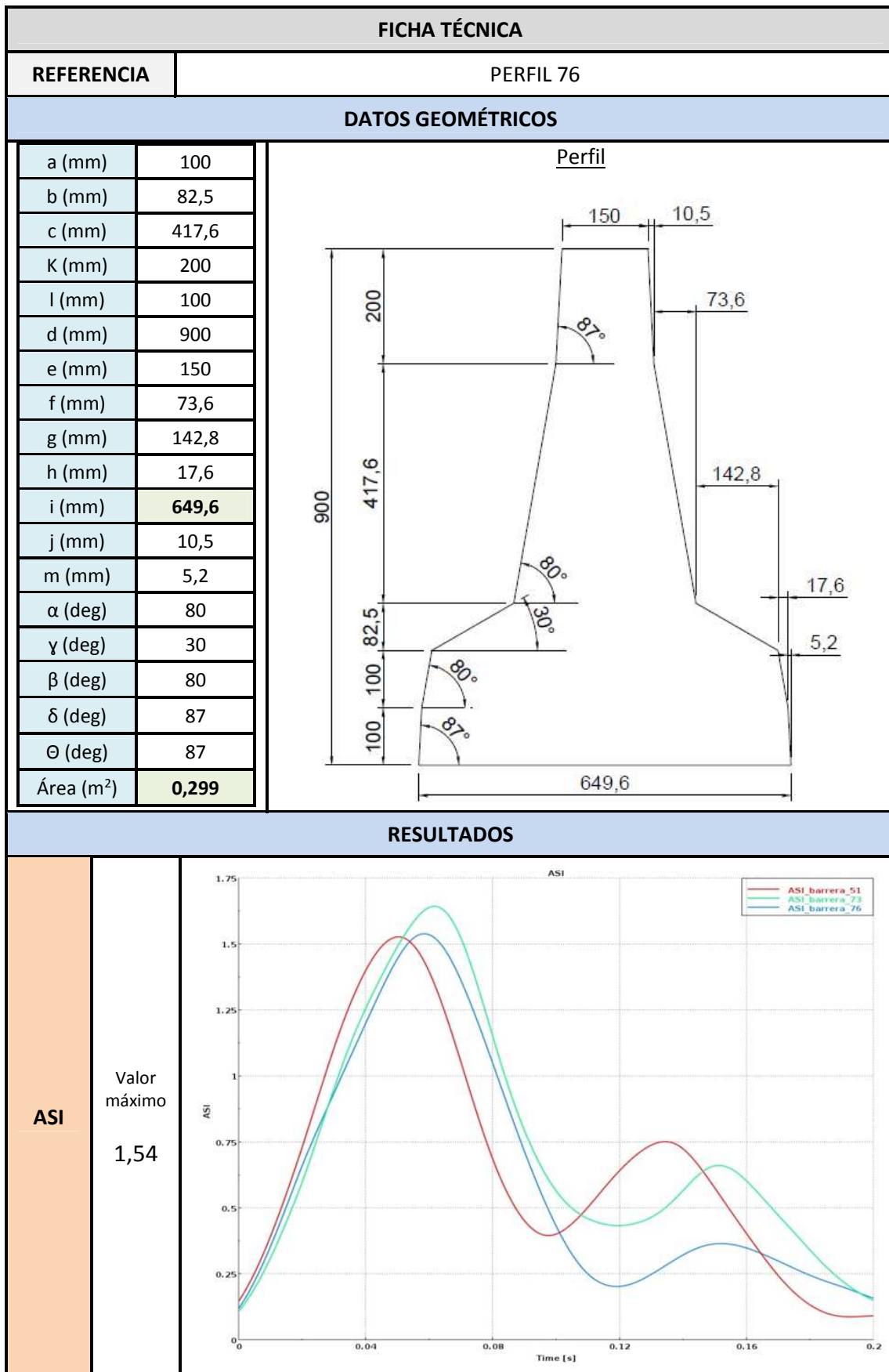


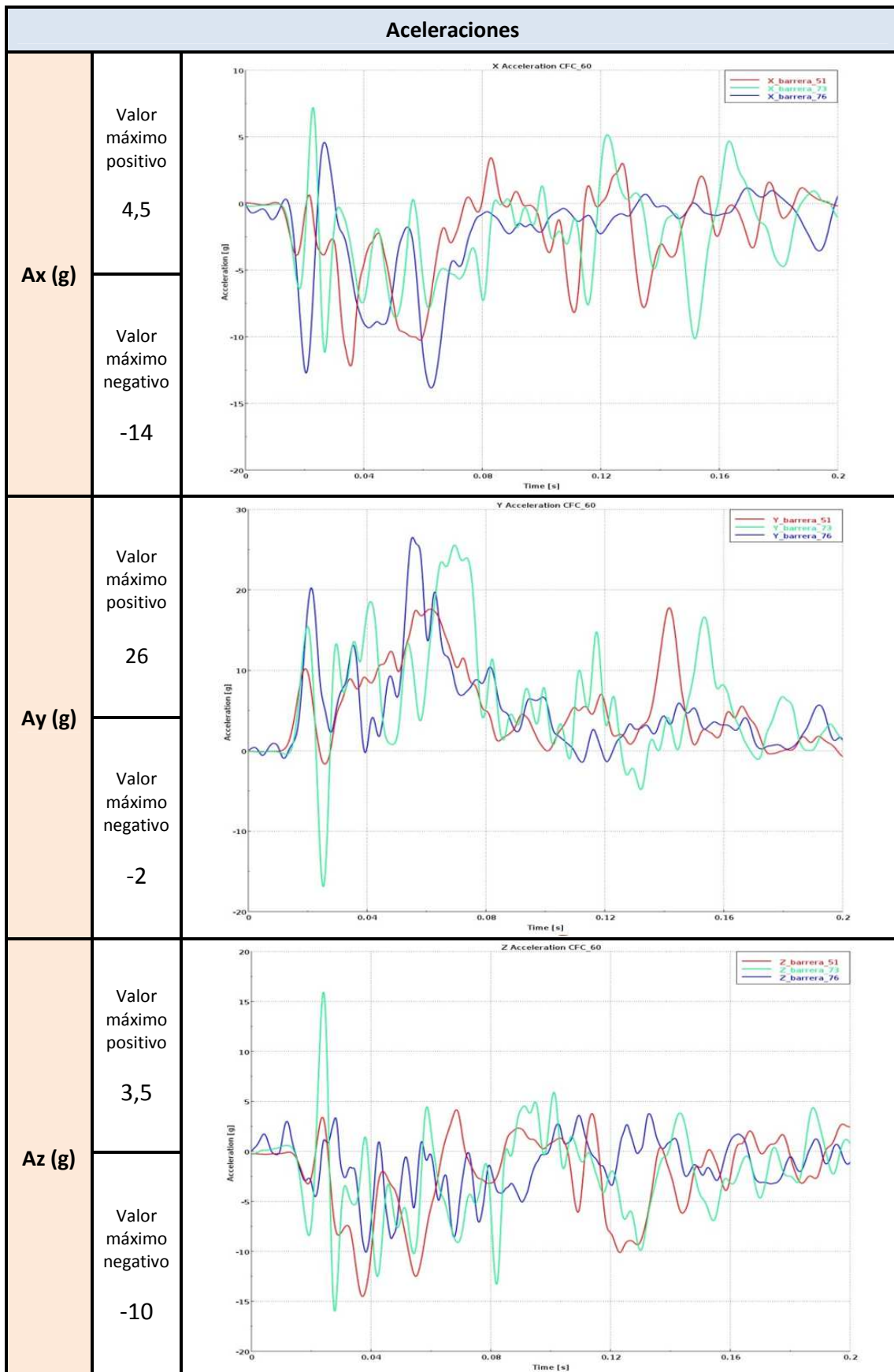


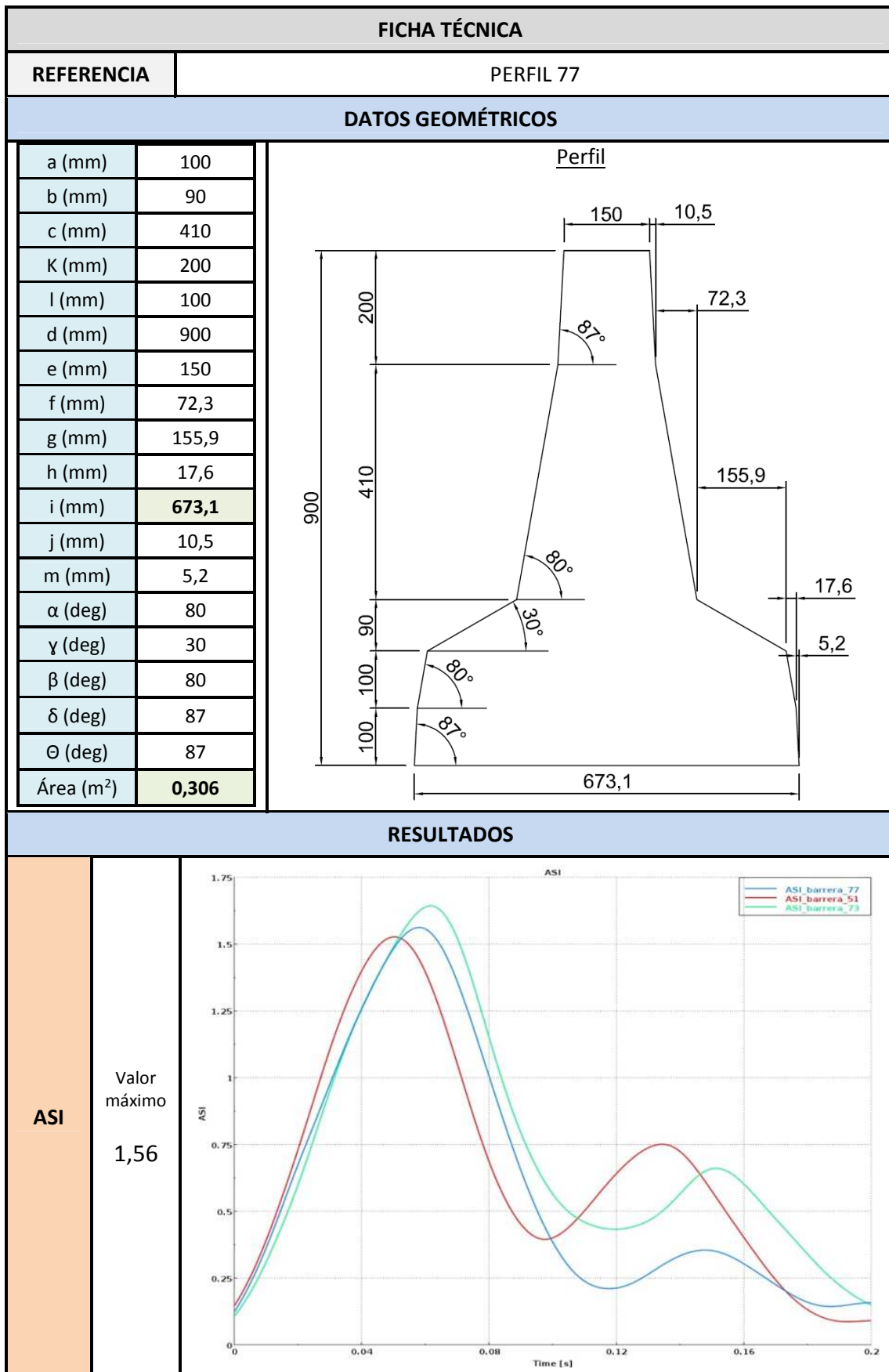
<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  16,5	
	Valor máximo negativo  -17	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  36,5	
	Valor máximo negativo  -5,5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  13,5	
	Valor máximo negativo  -21	

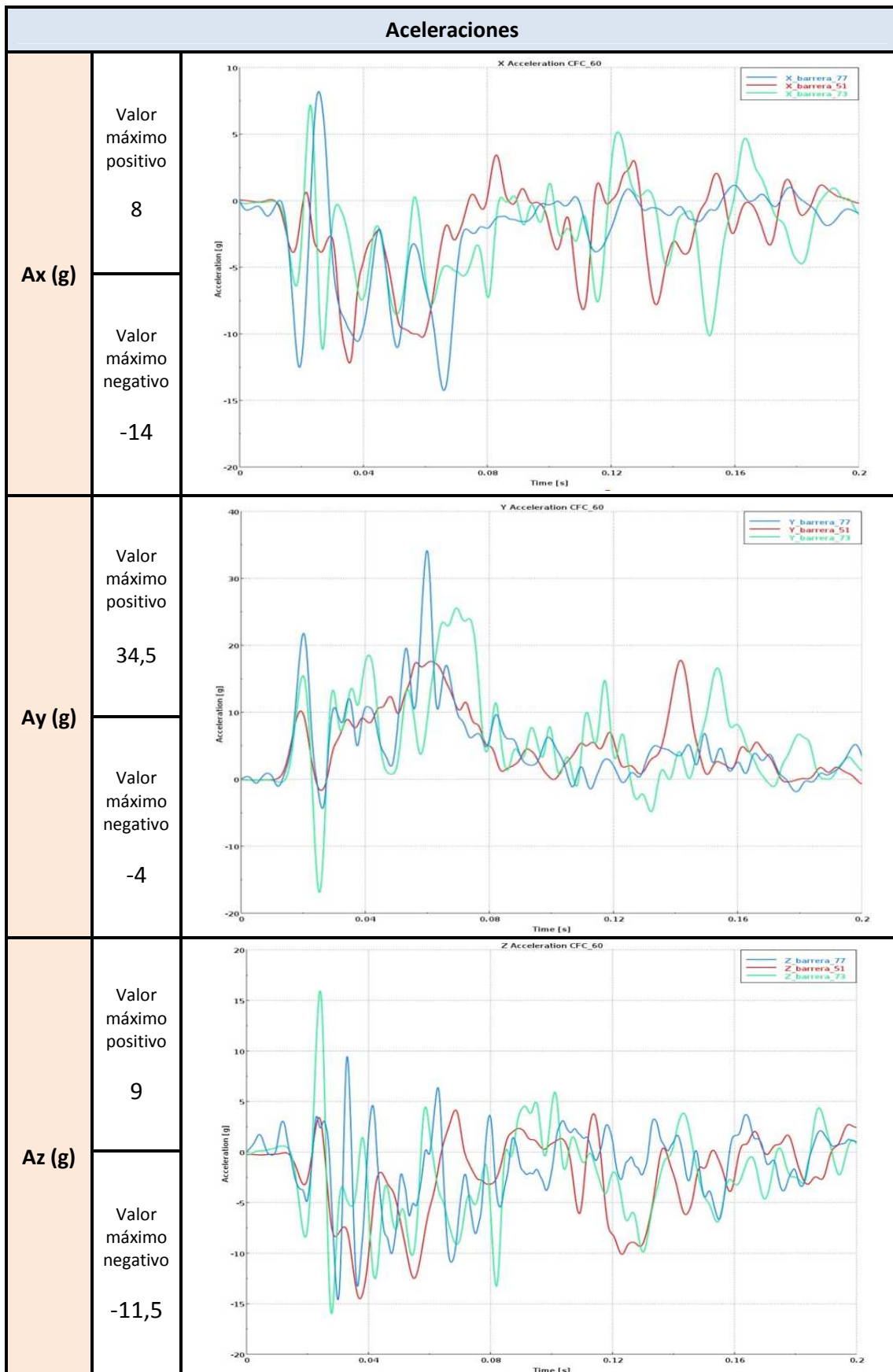


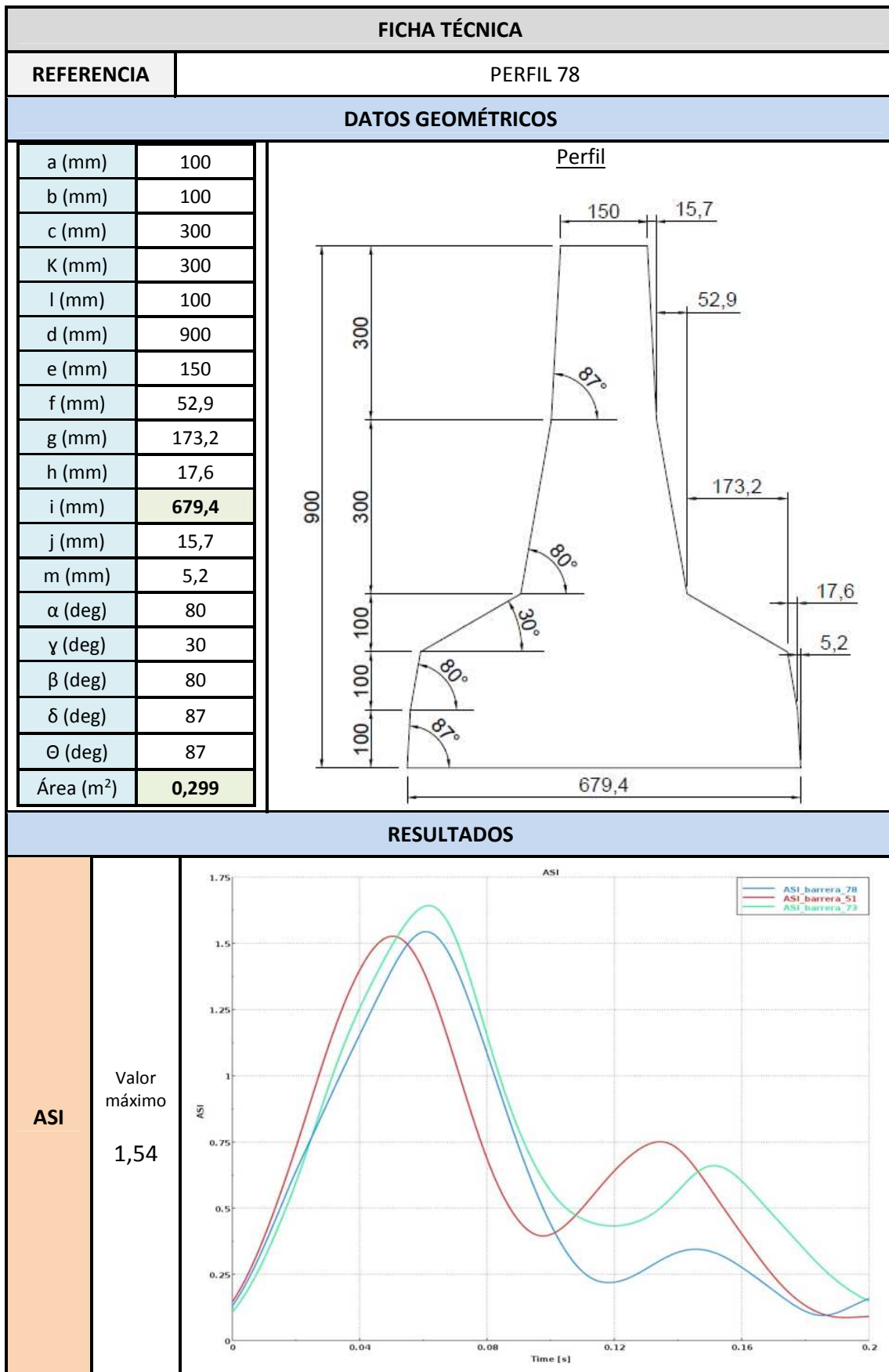




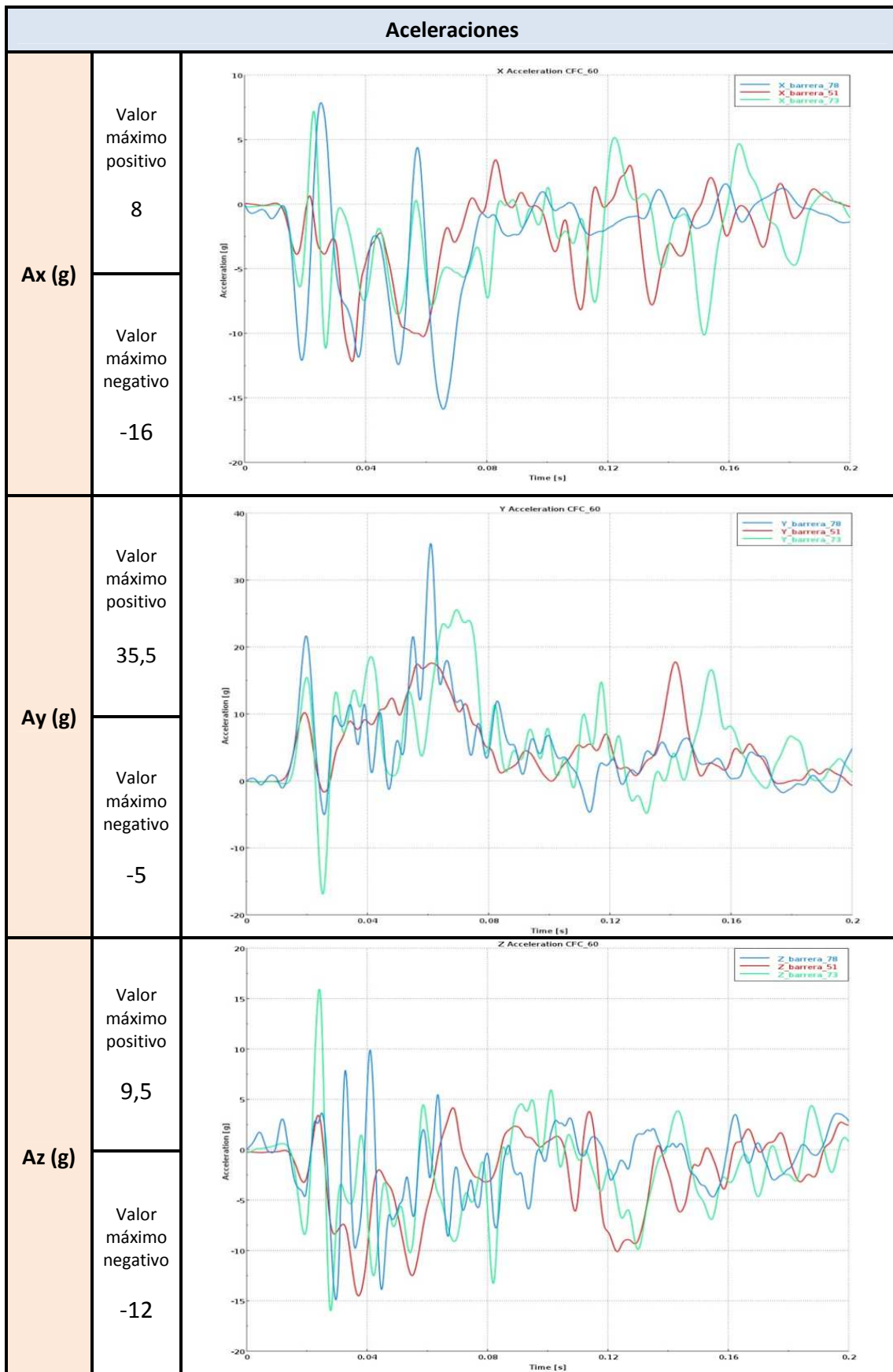


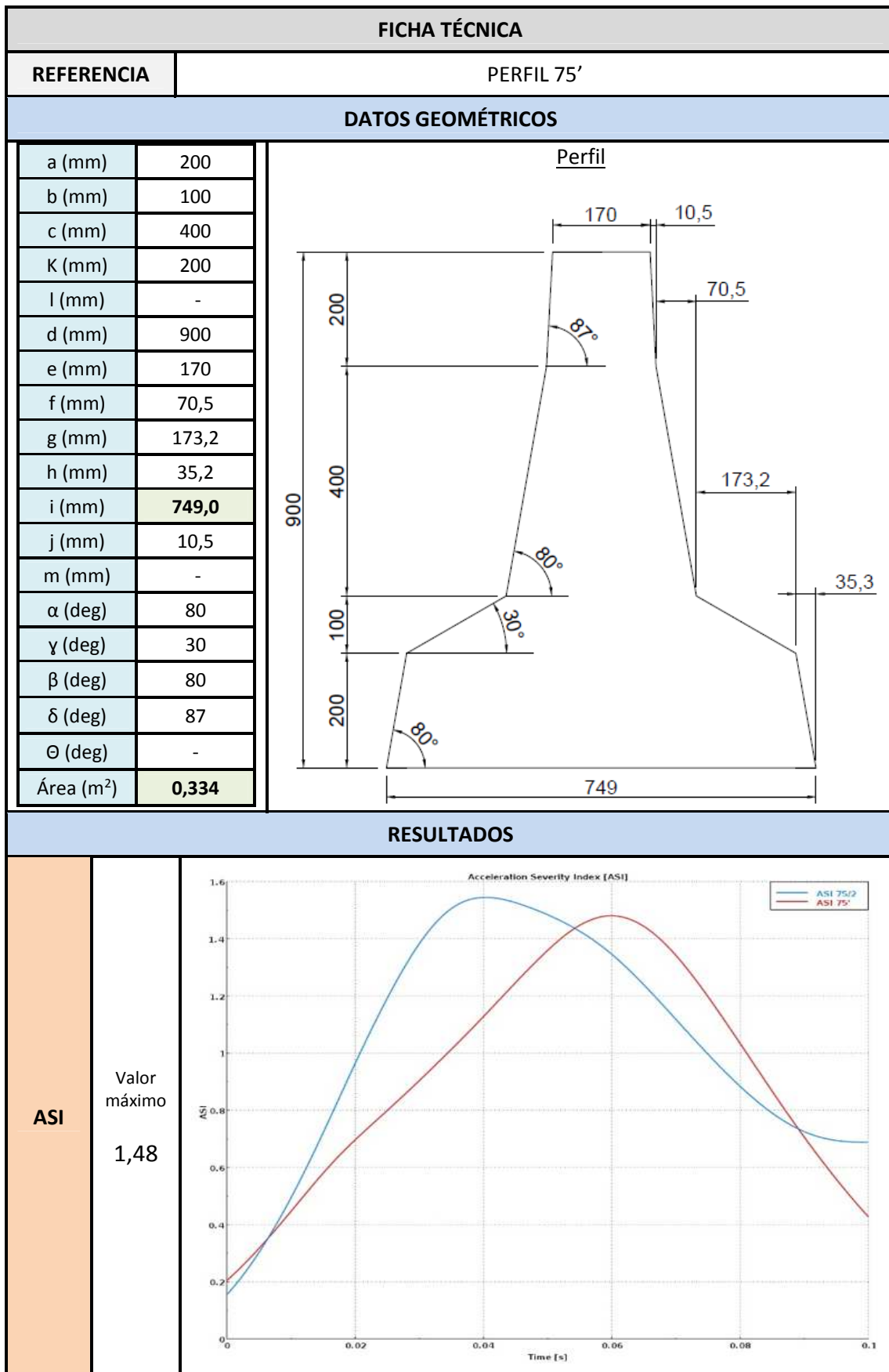


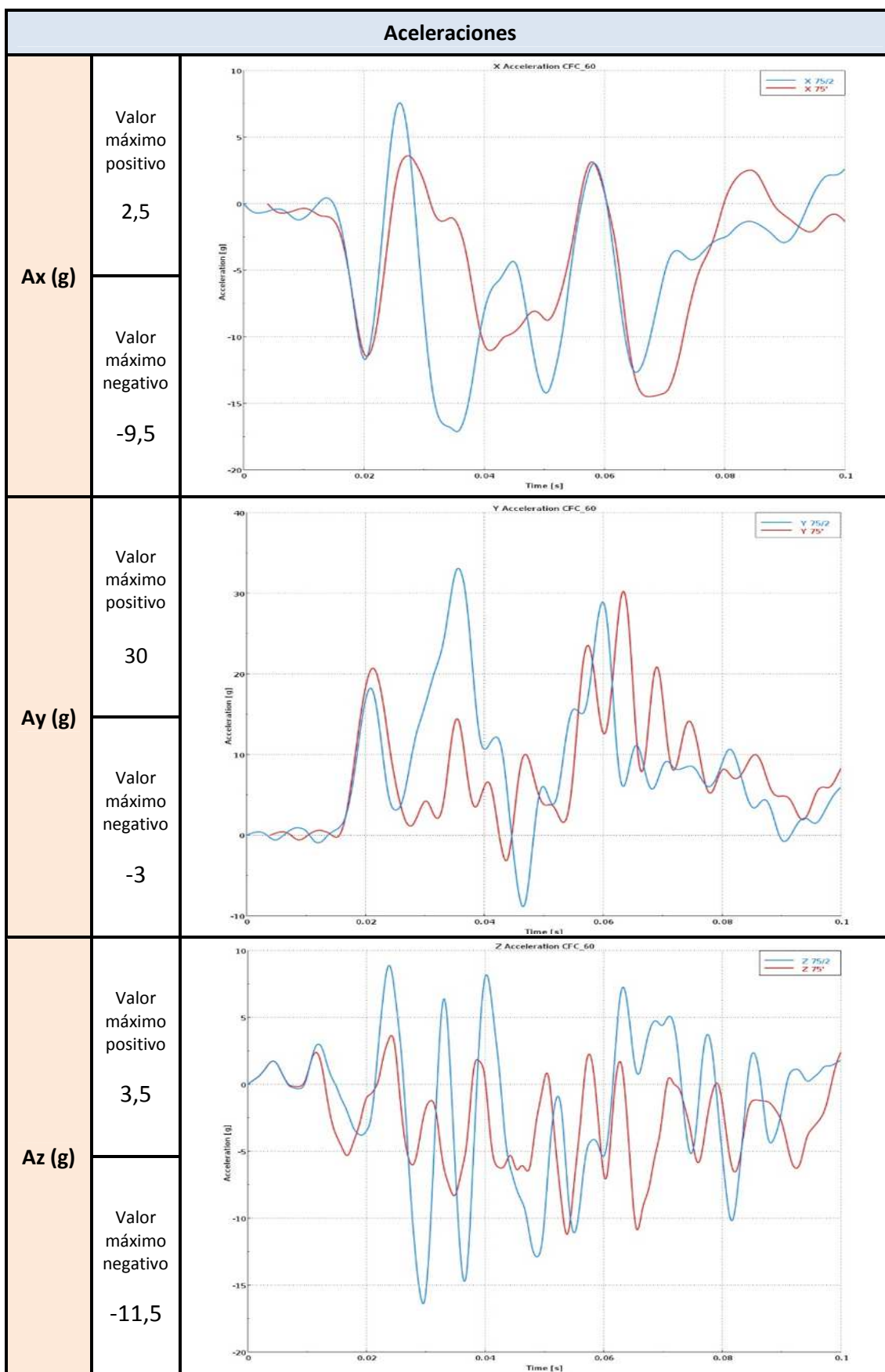


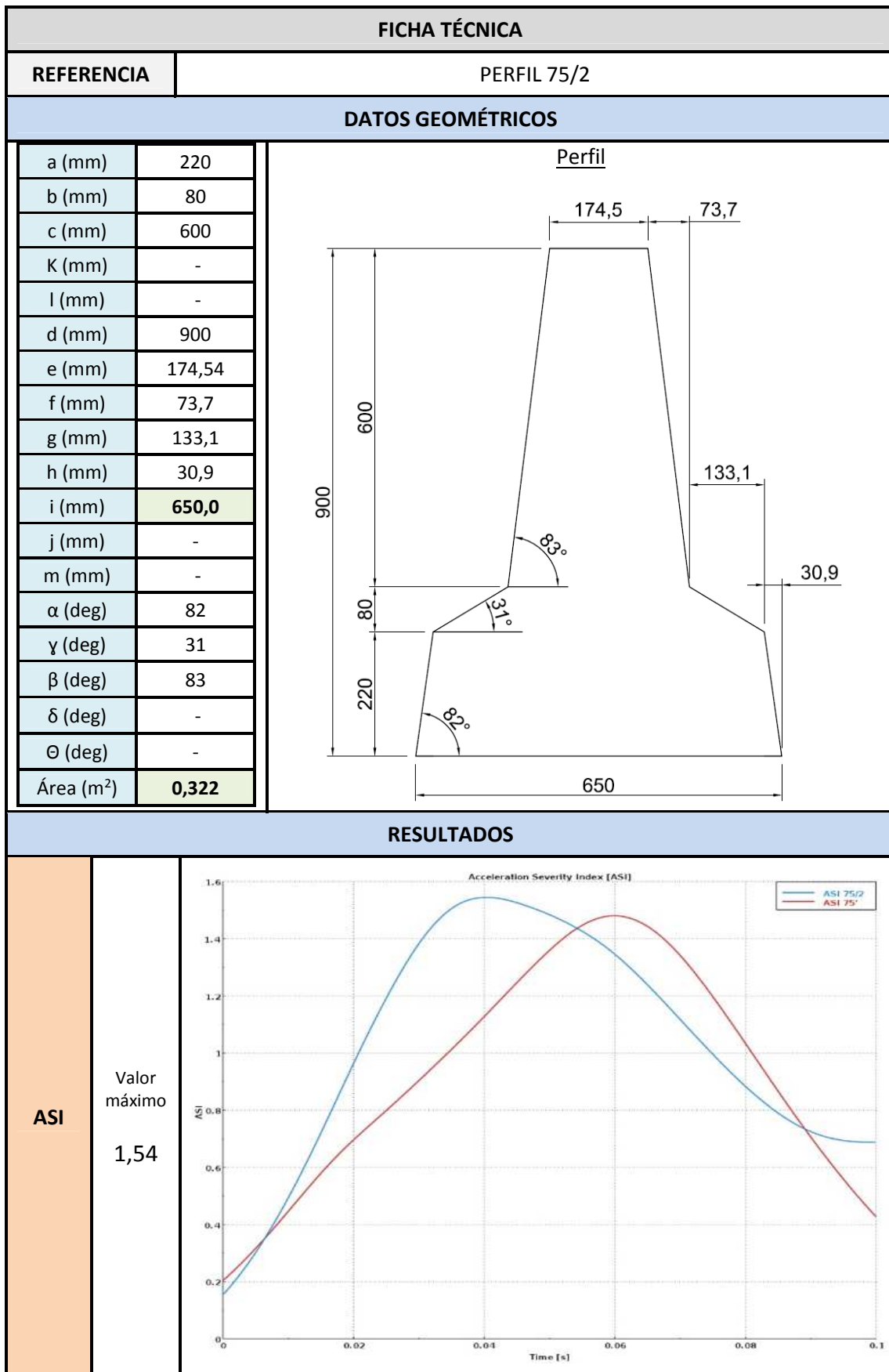


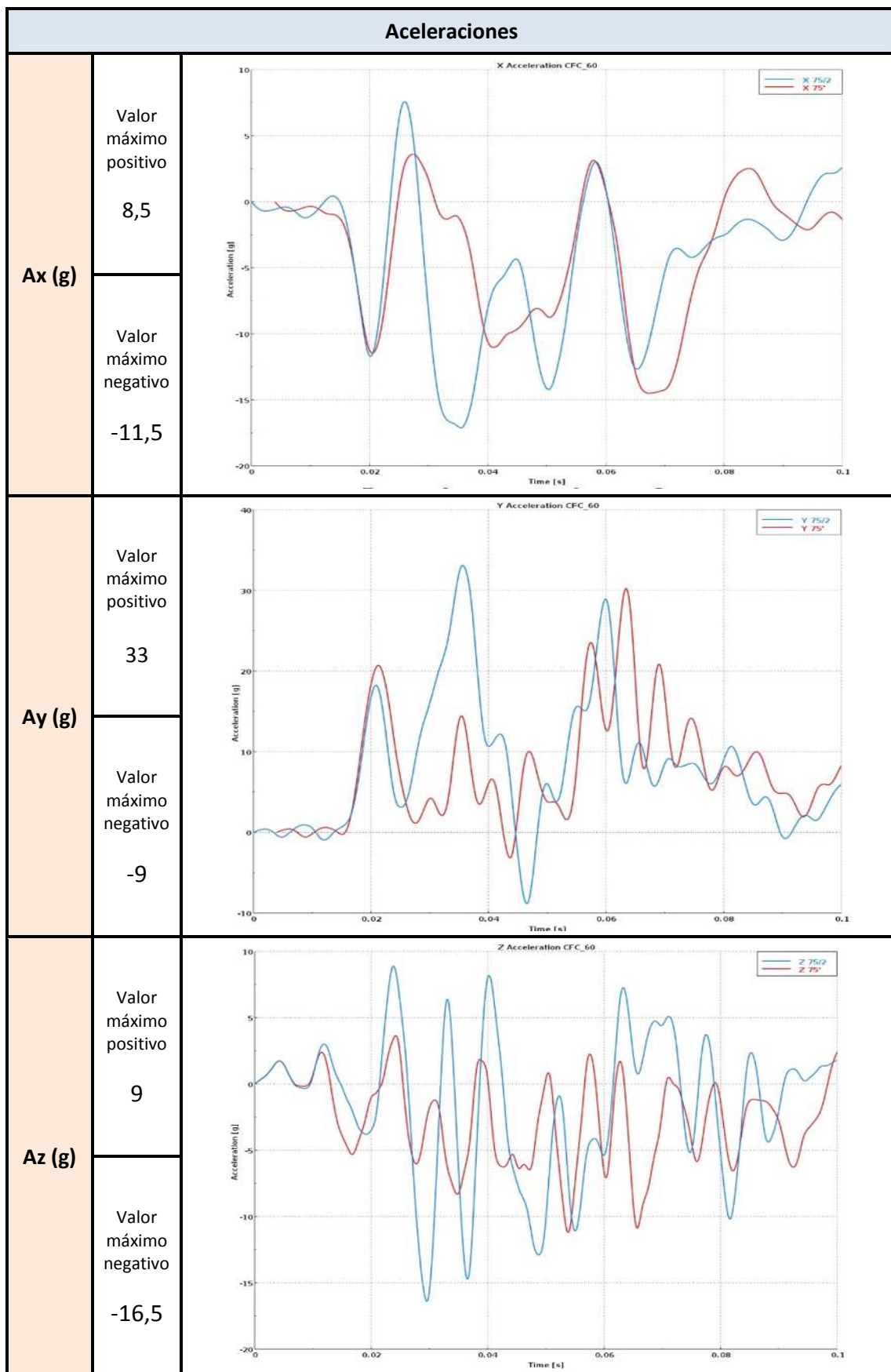


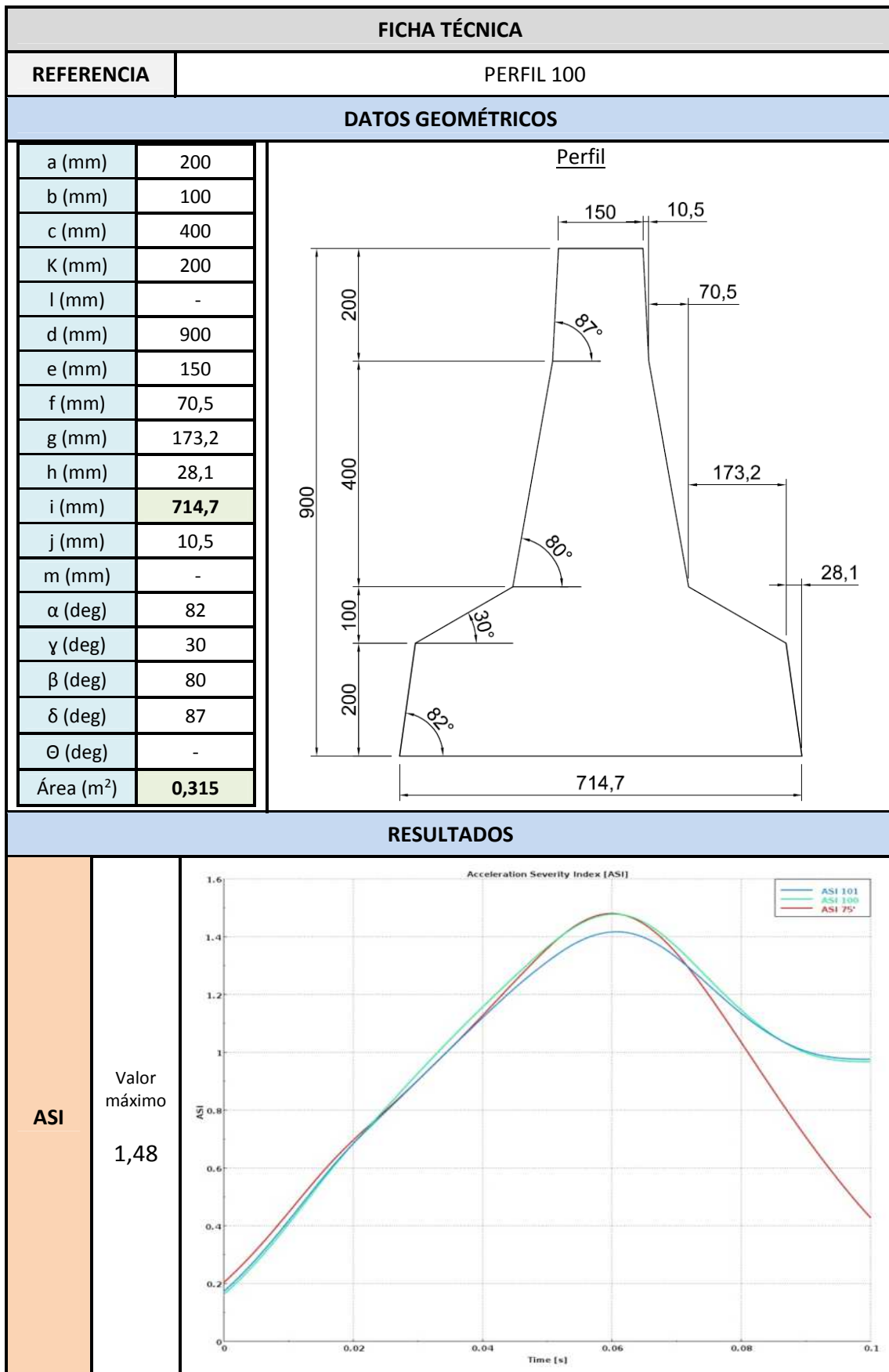


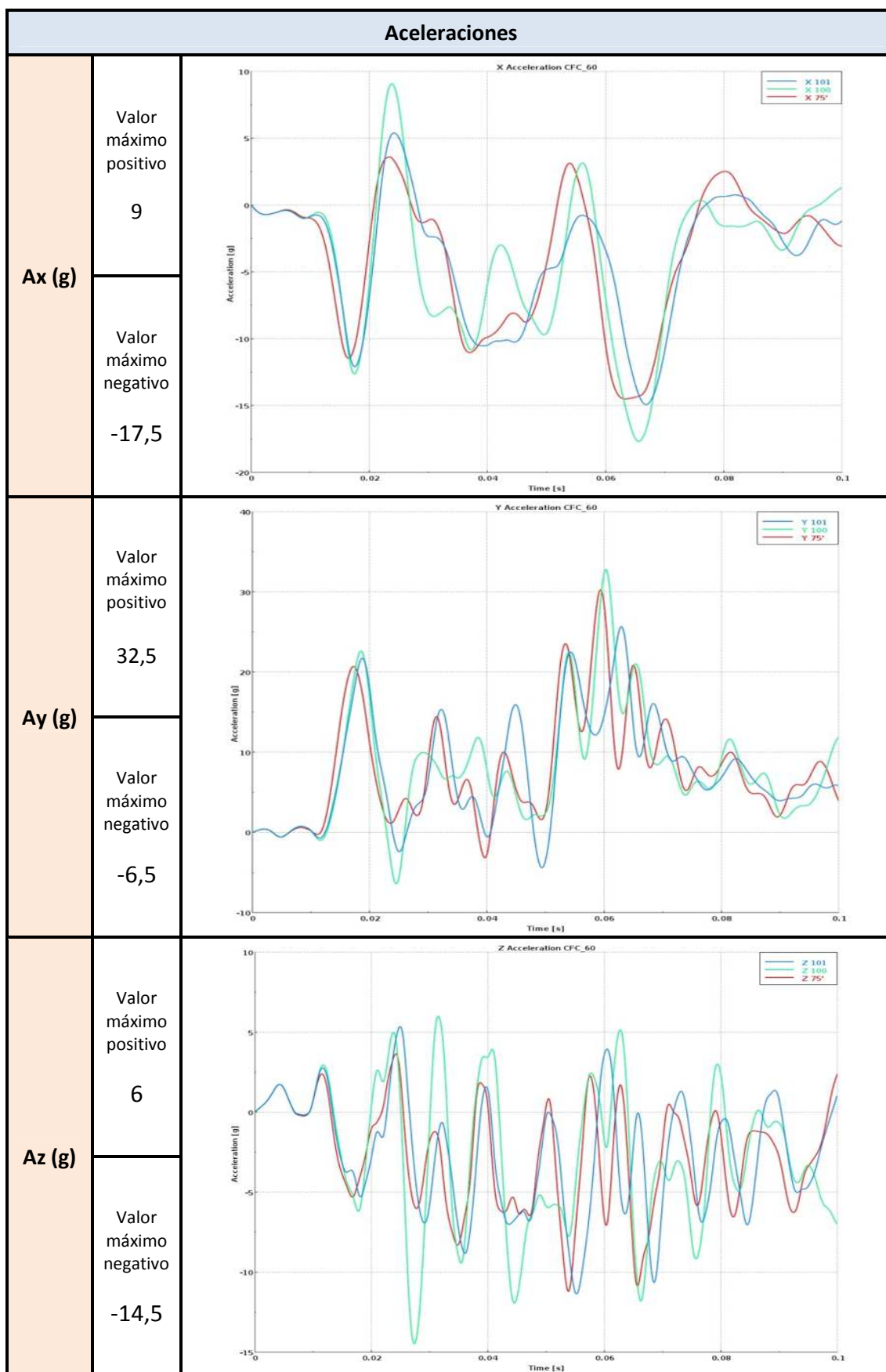


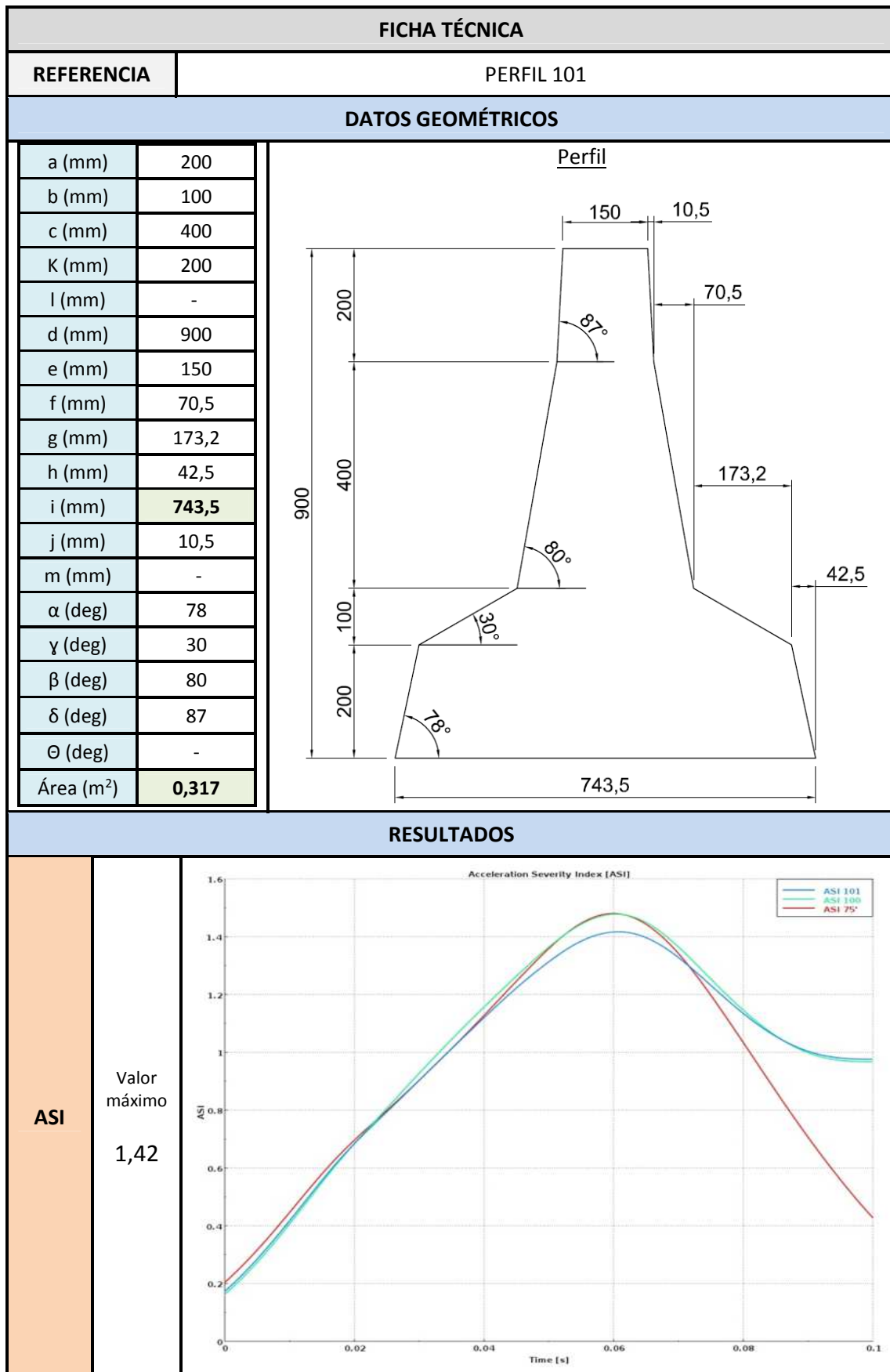






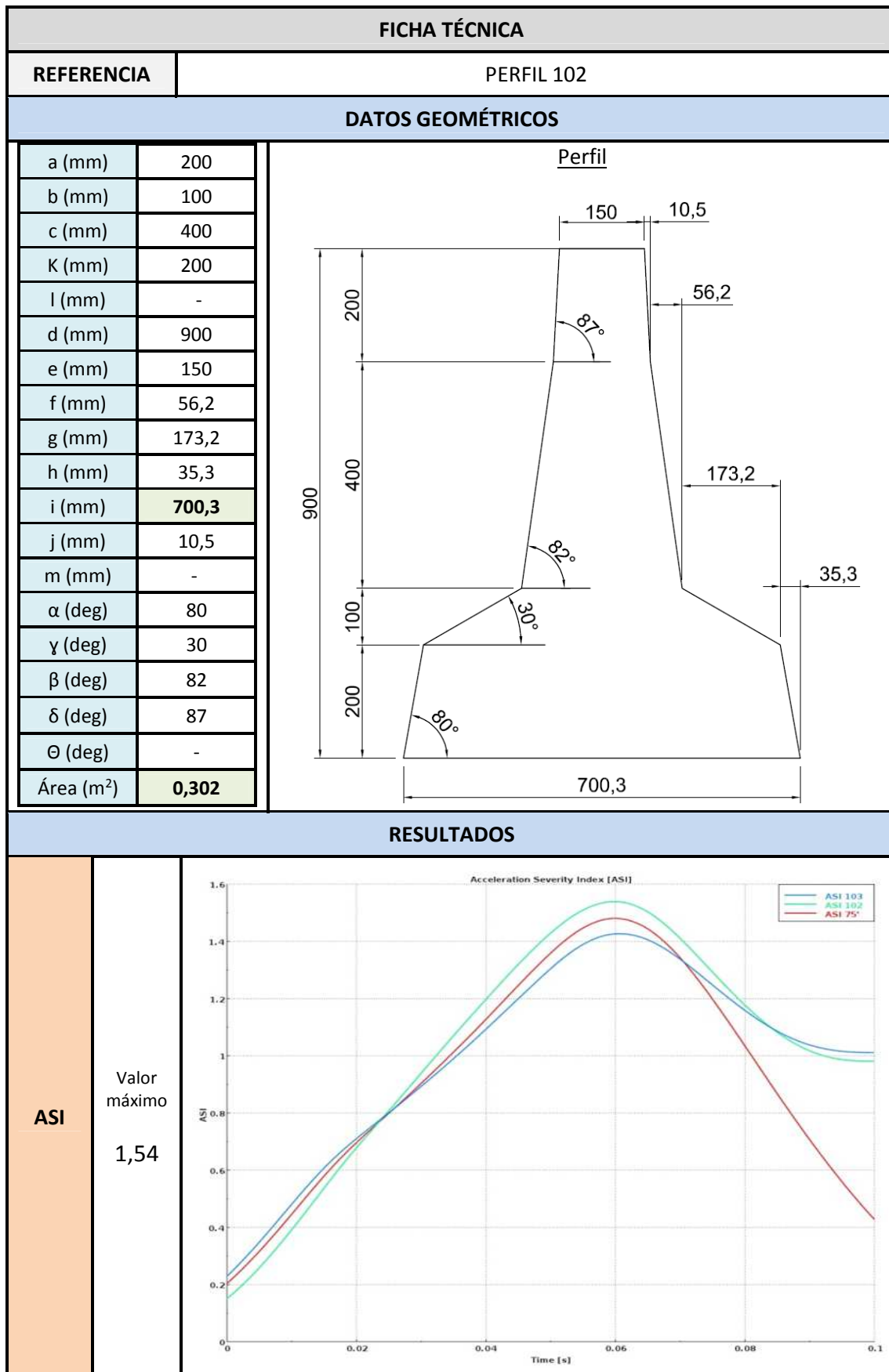




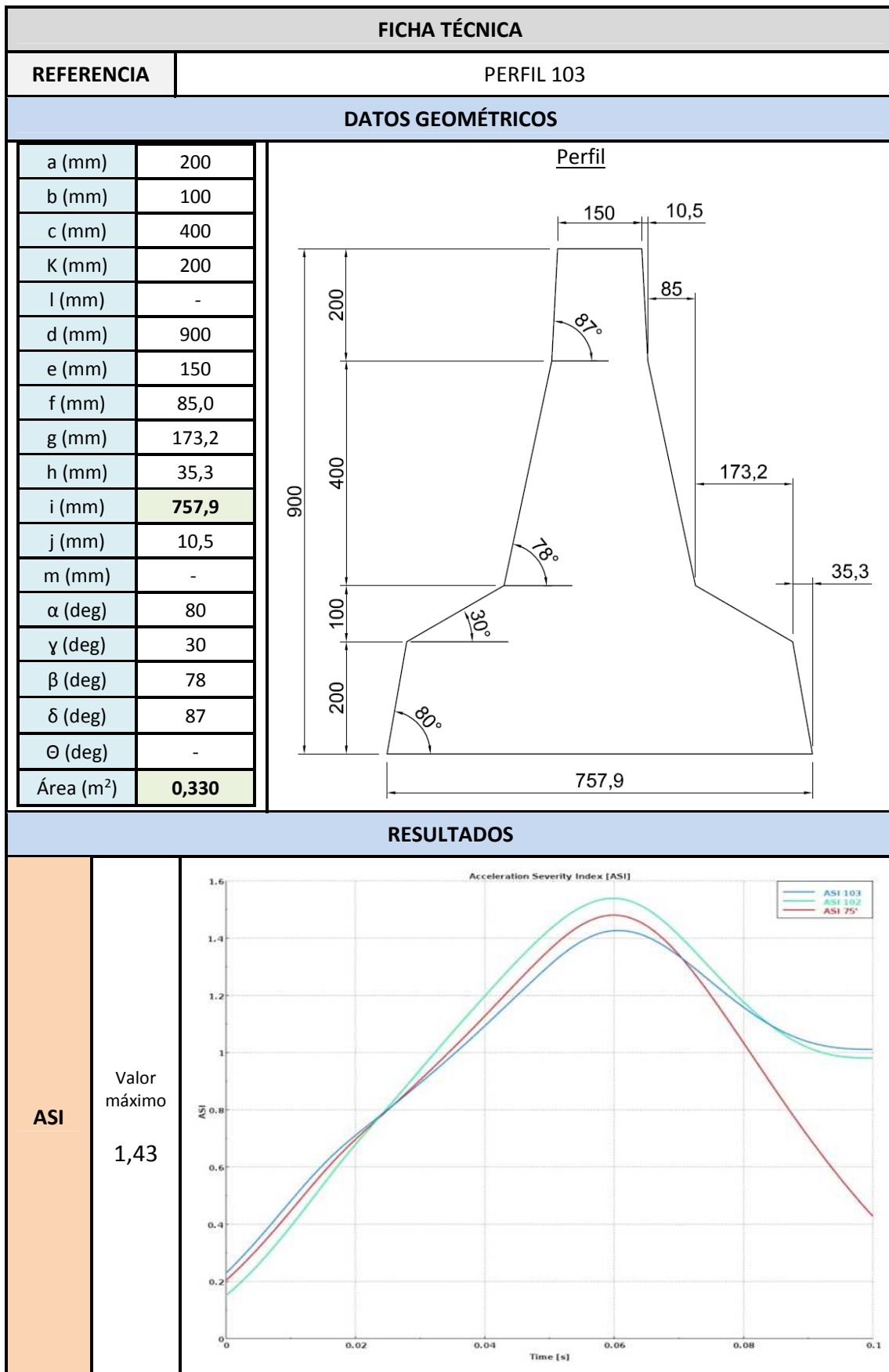




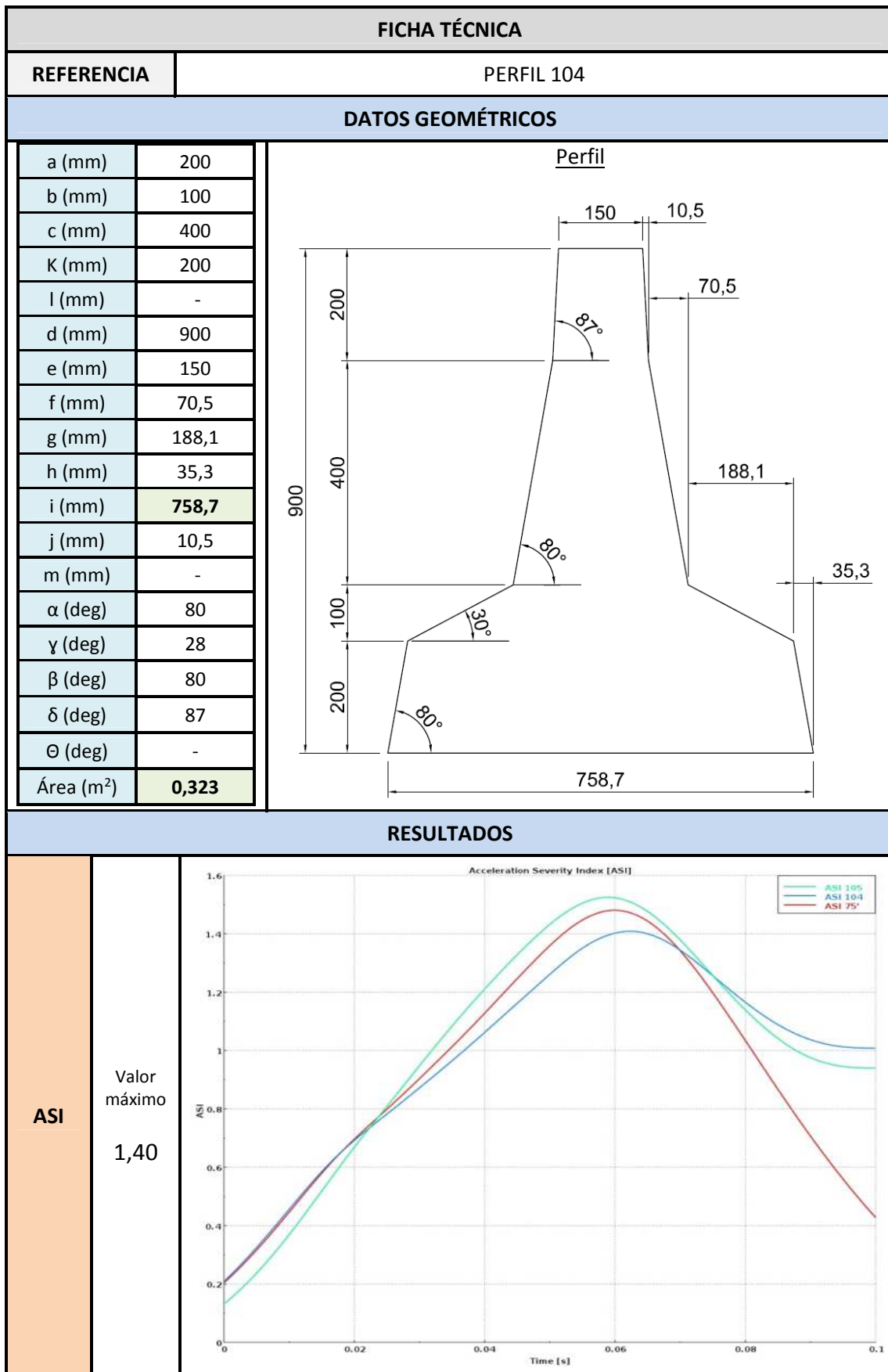
<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  5,5	
	Valor máximo negativo  -15	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  25,5	
	Valor máximo negativo  -4,5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  5,5	
	Valor máximo negativo  -11,5	

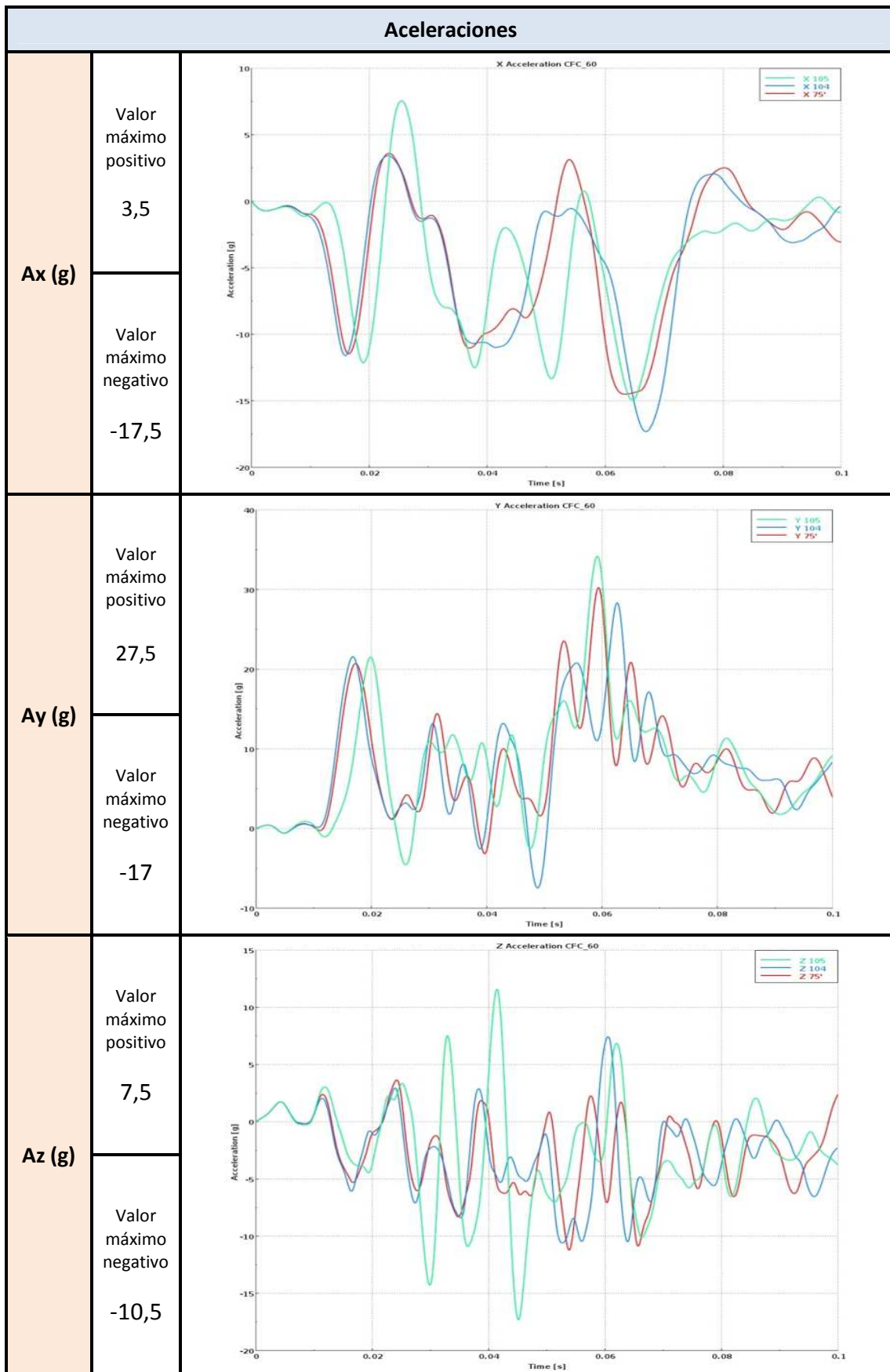


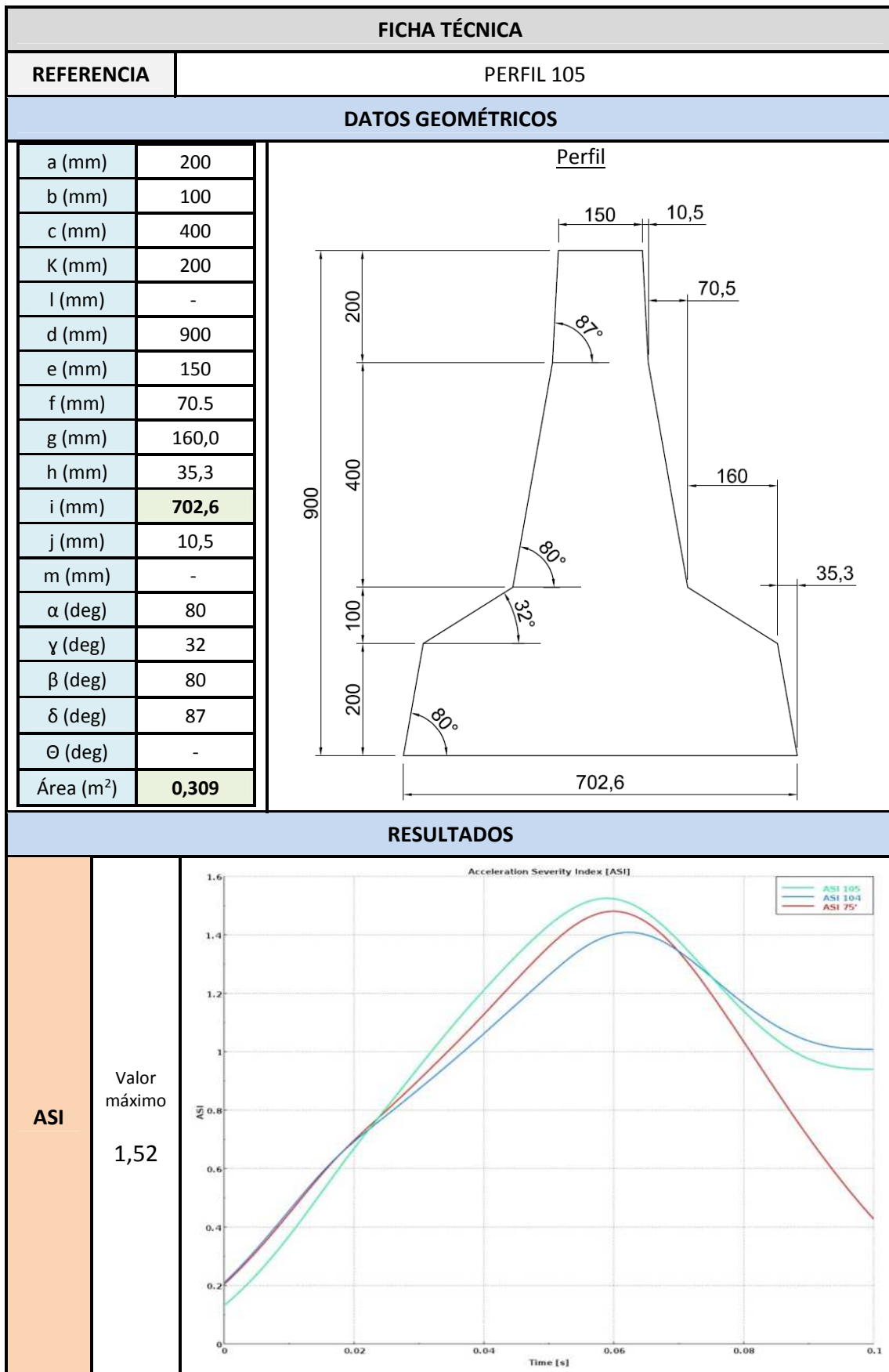
<b>Aceleraciones</b>			
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo	5,5	
	Valor máximo negativo	-17,5	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo	31	
	Valor máximo negativo	-6,5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo	9,5	
	Valor máximo negativo	-15,5	



<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo  2,5	
	Valor máximo negativo  -15,5	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo  29	
	Valor máximo negativo  -5,5	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo  3	
	Valor máximo negativo  -9,5	

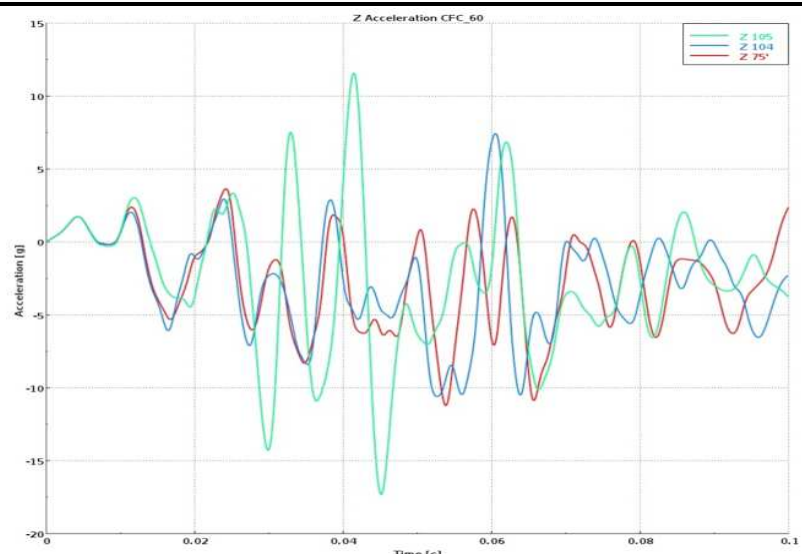
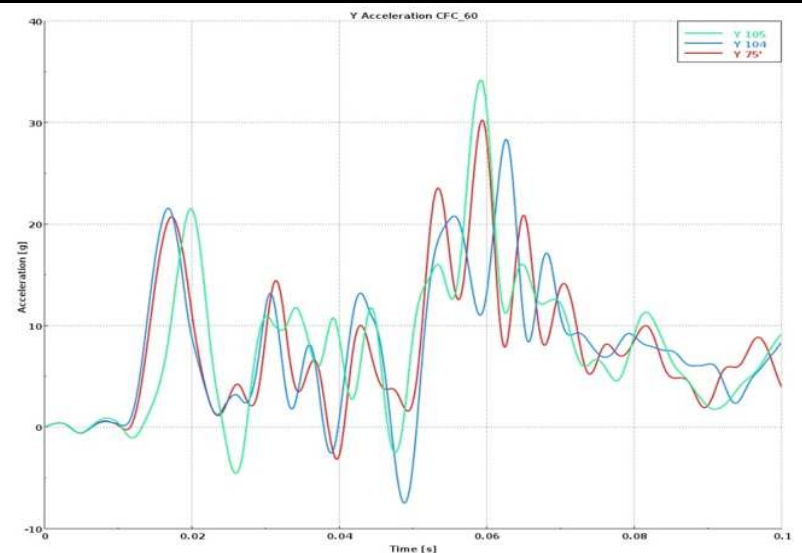
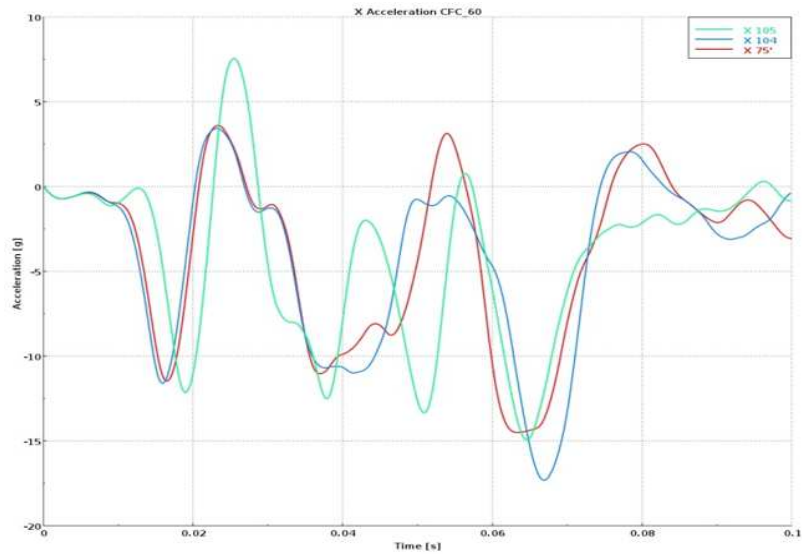




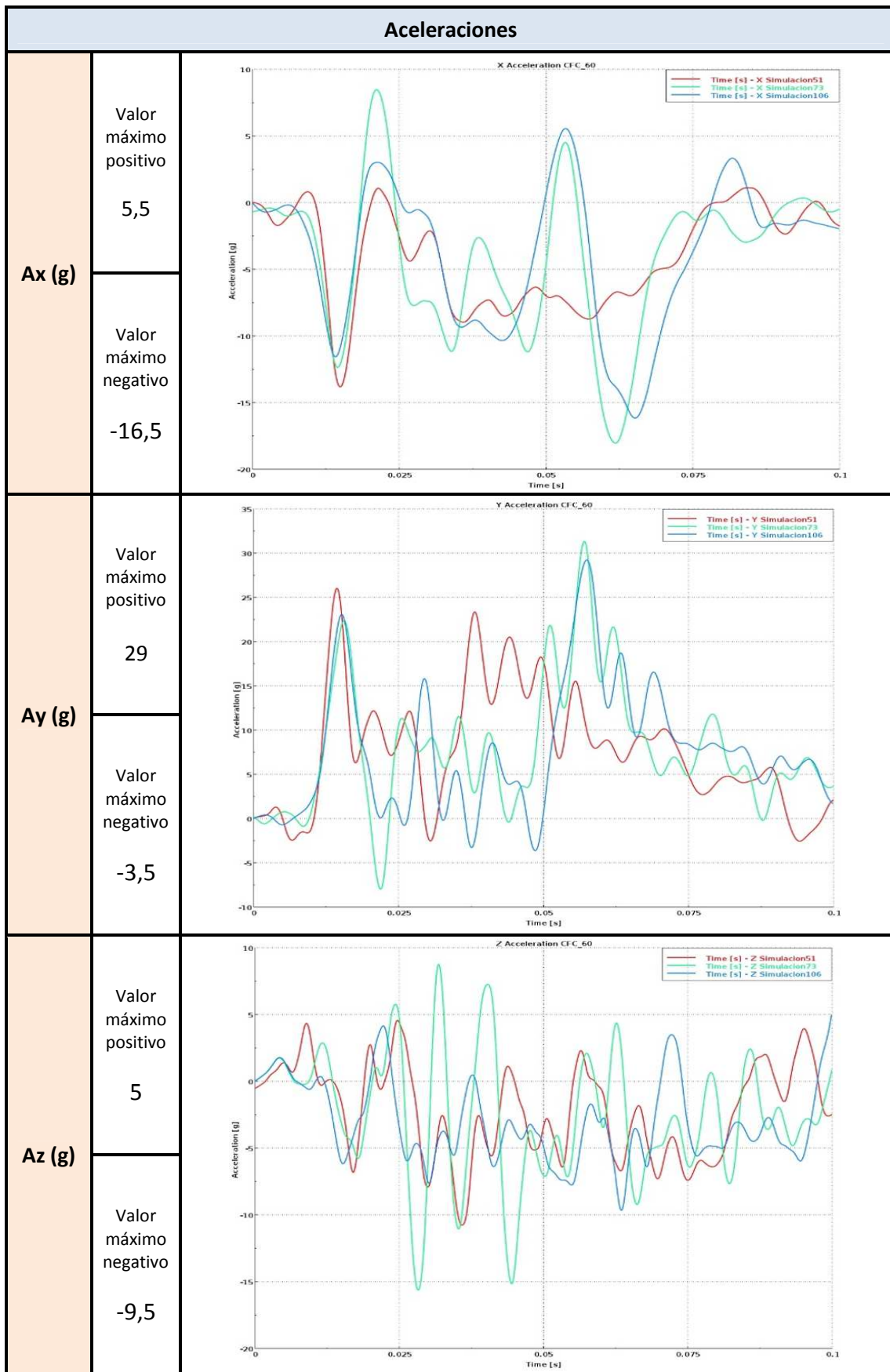


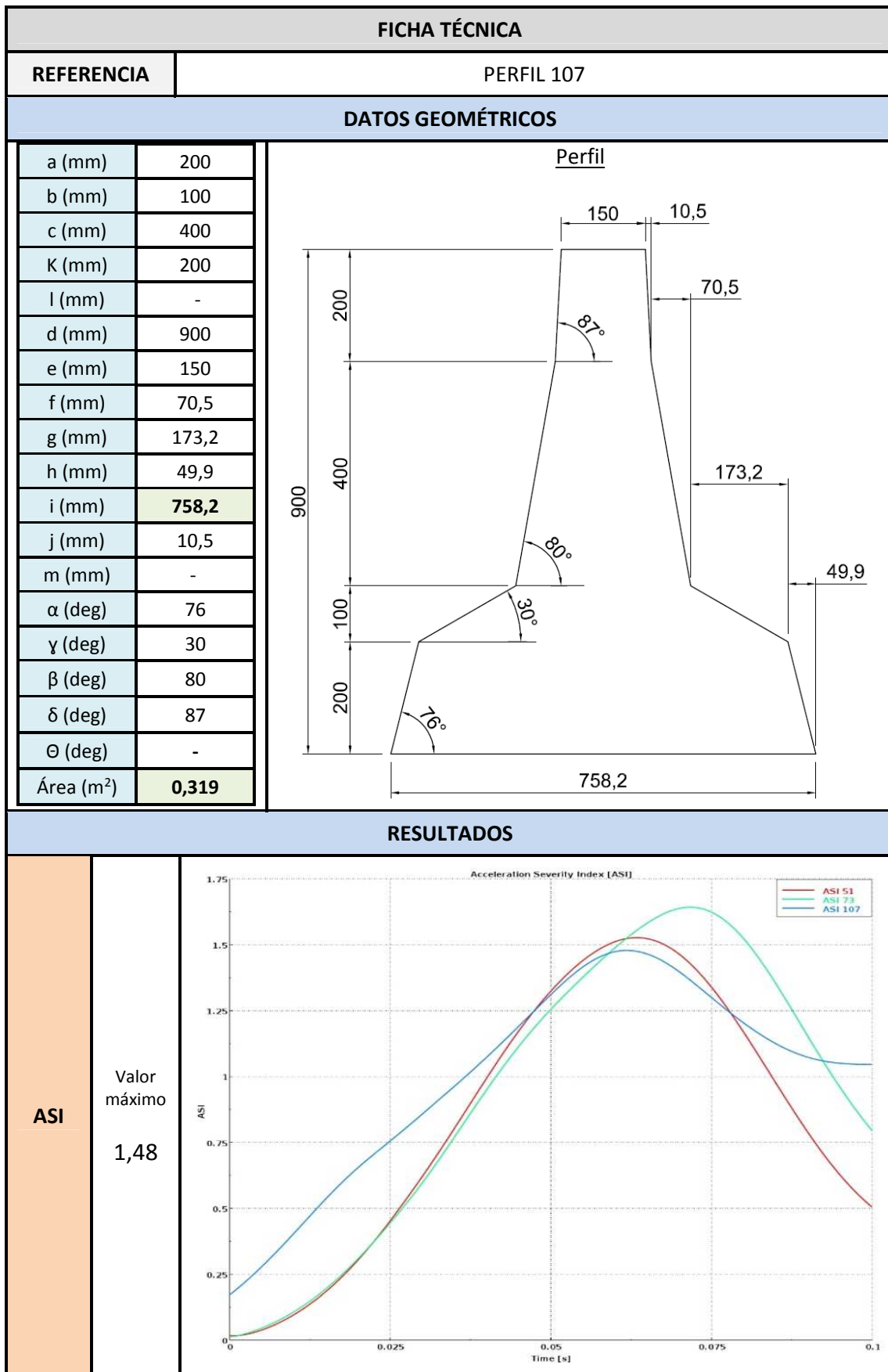


<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo	5,5
	Valor máximo negativo	-15
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo	33,5
	Valor máximo negativo	-4,5
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo	11,5
	Valor máximo negativo	-17

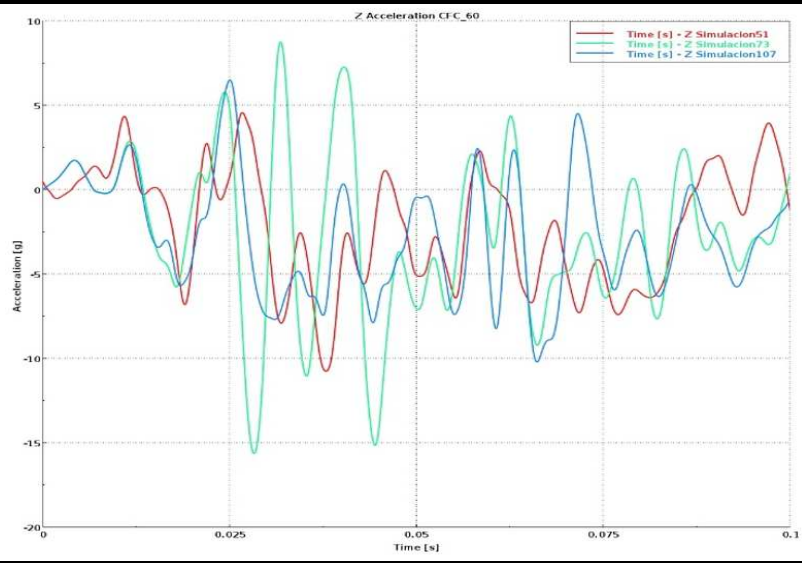
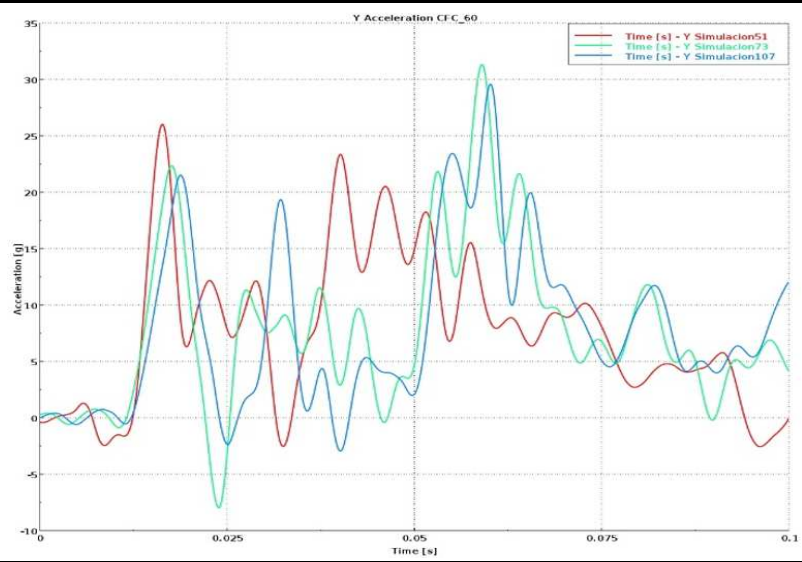
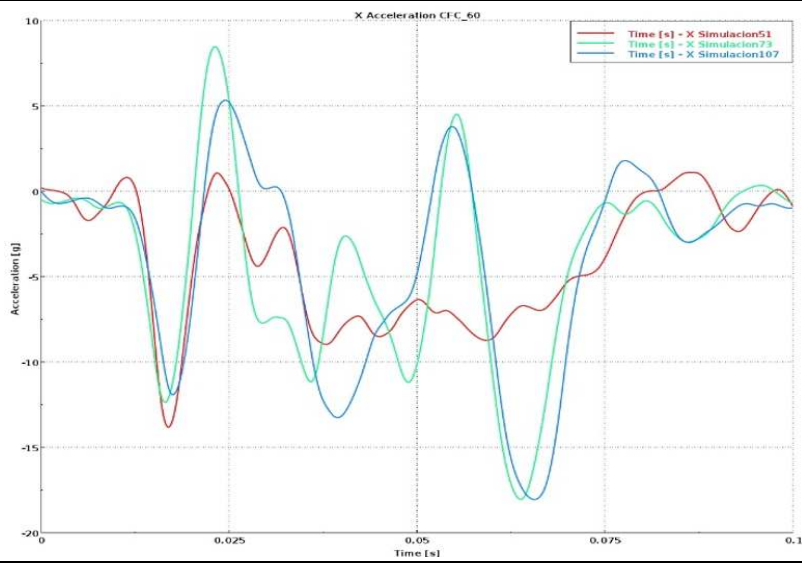


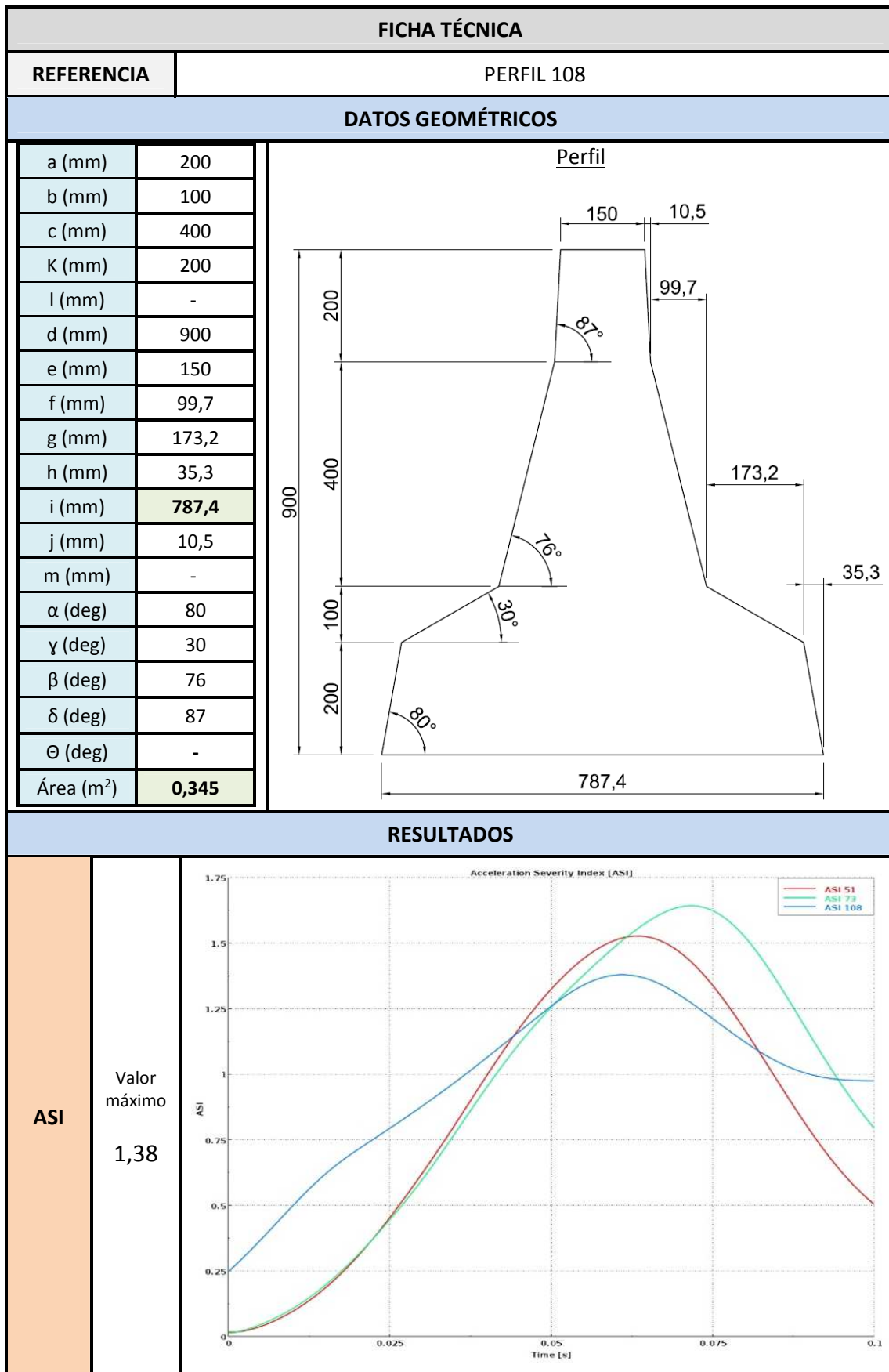
FICHA TÉCNICA		
REFERENCIA	PERFIL 106	
DATOS GEOMÉTRICOS		
a (mm)	200	
b (mm)	100	
c (mm)	400	
K (mm)	200	
l (mm)	-	
d (mm)	900	
e (mm)	150	
f (mm)	85,0	
g (mm)	188,1	
h (mm)	42,5	
i (mm)	<b>802,2</b>	
j (mm)	10,5	
m (mm)	-	
$\alpha$ (deg)	78	
$\gamma$ (deg)	28	
$\beta$ (deg)	78	
$\delta$ (deg)	87	
$\Theta$ (deg)	-	
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,339</b>	
RESULTADOS		
ASI	Valor máximo	
	1,44	

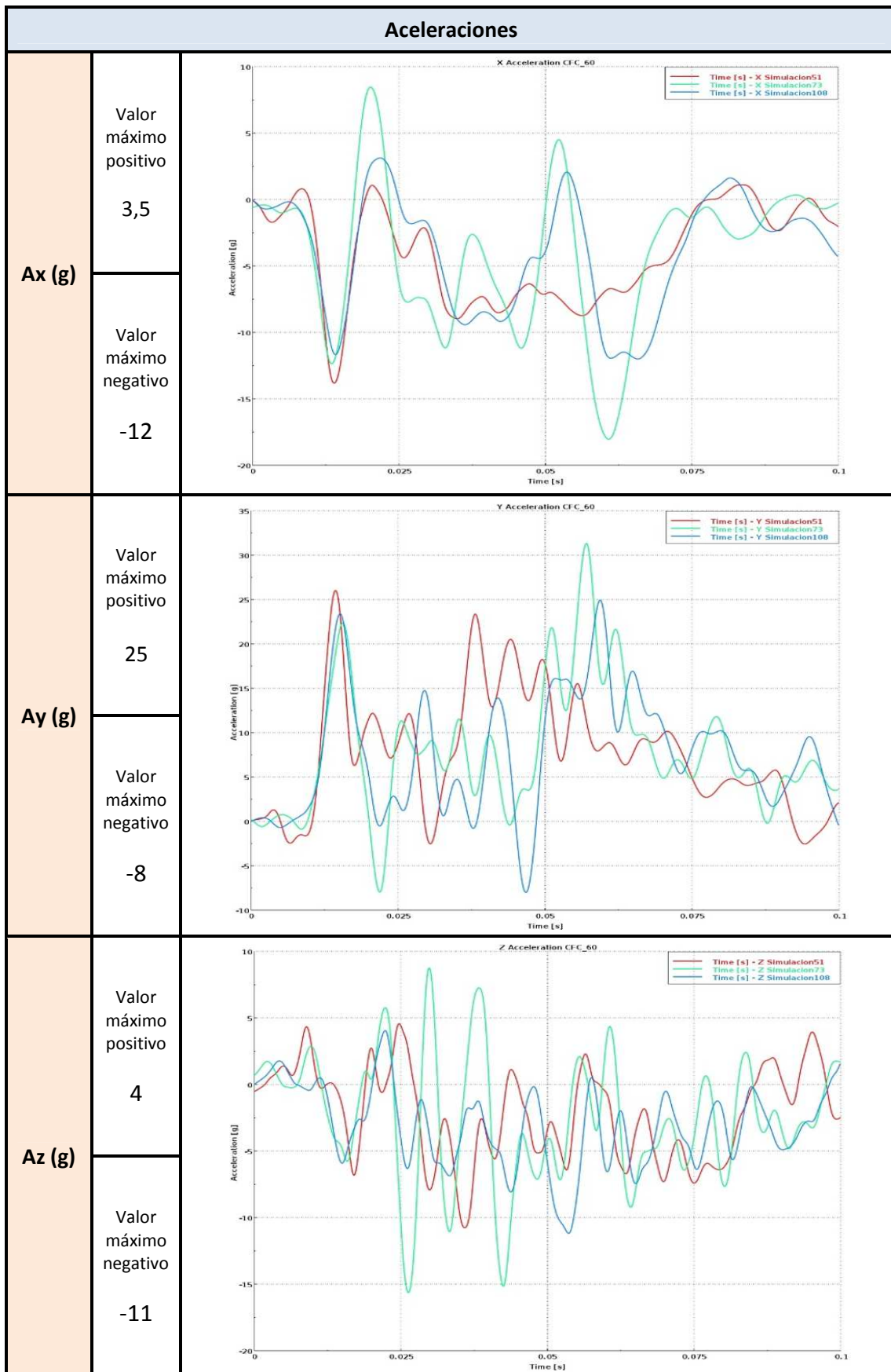


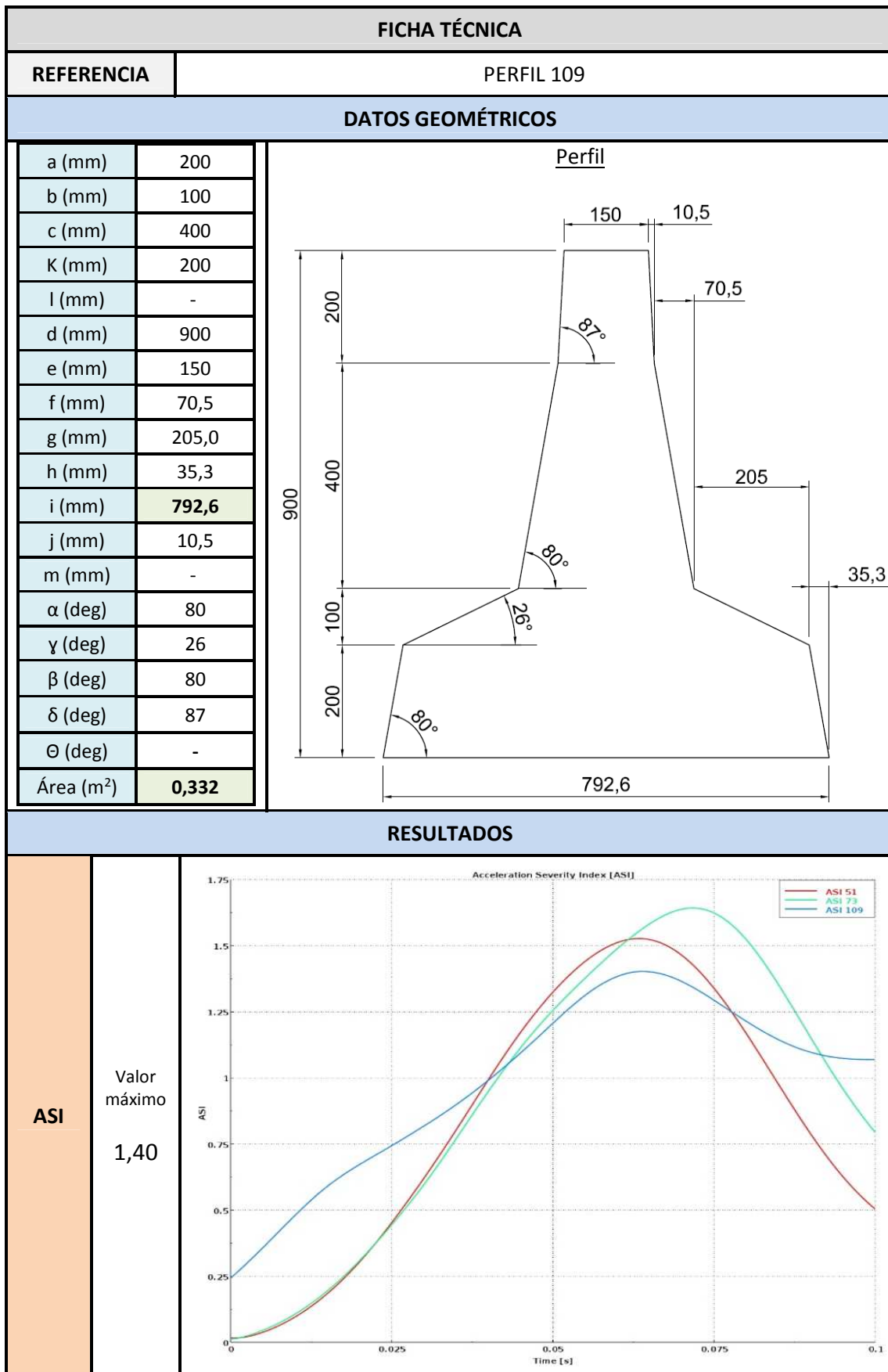


<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo	5,5
	Valor máximo negativo	-18
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo	29
	Valor máximo negativo	-2,5
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo	6,5
	Valor máximo negativo	-10



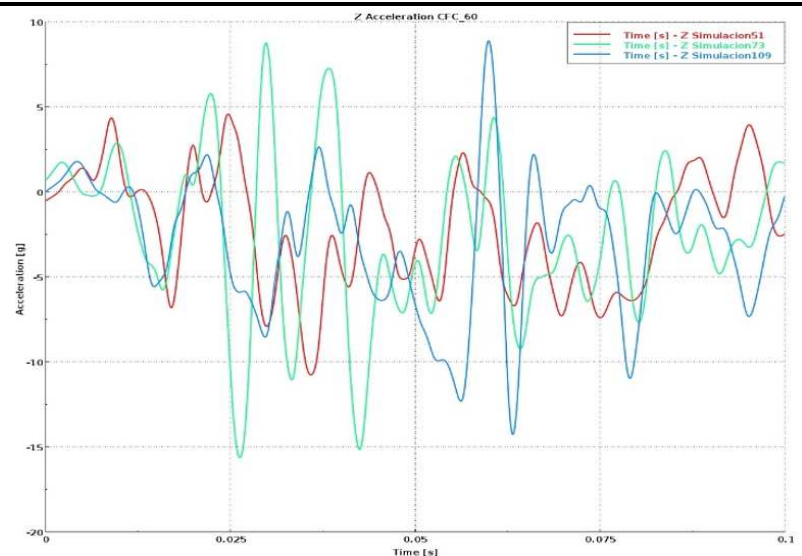
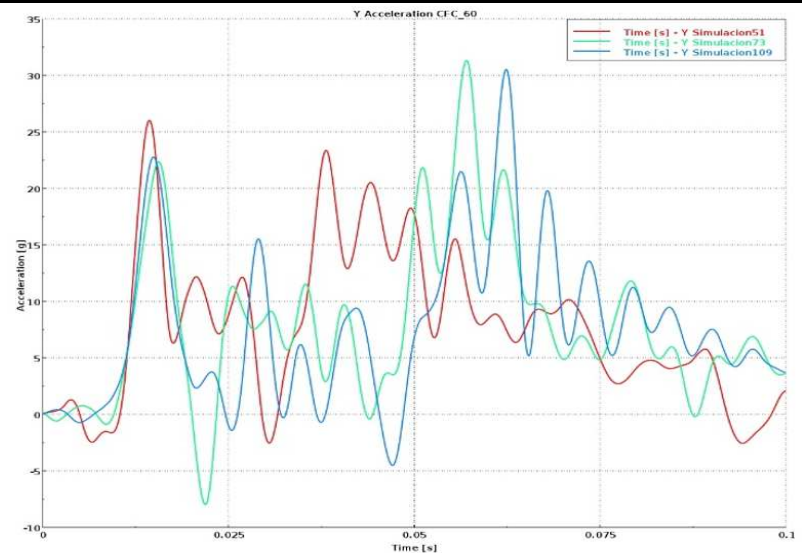
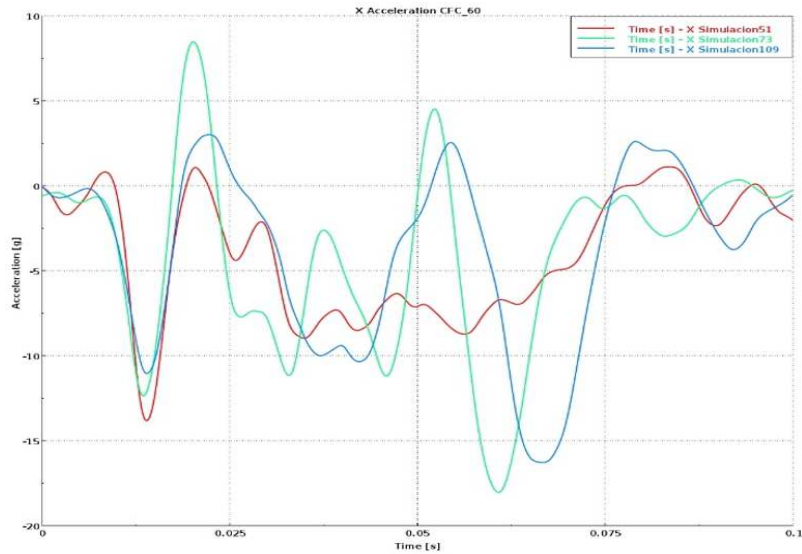


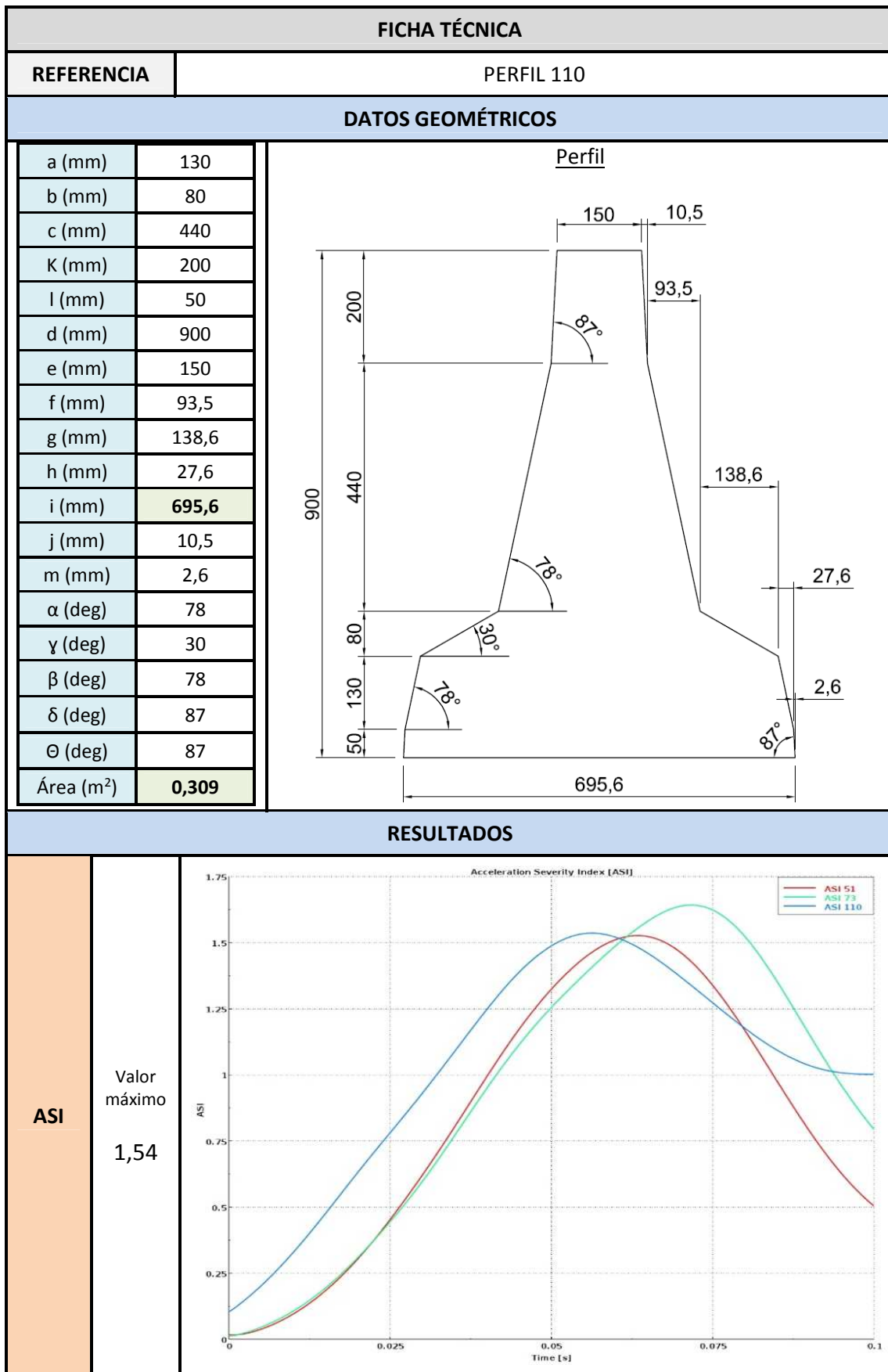


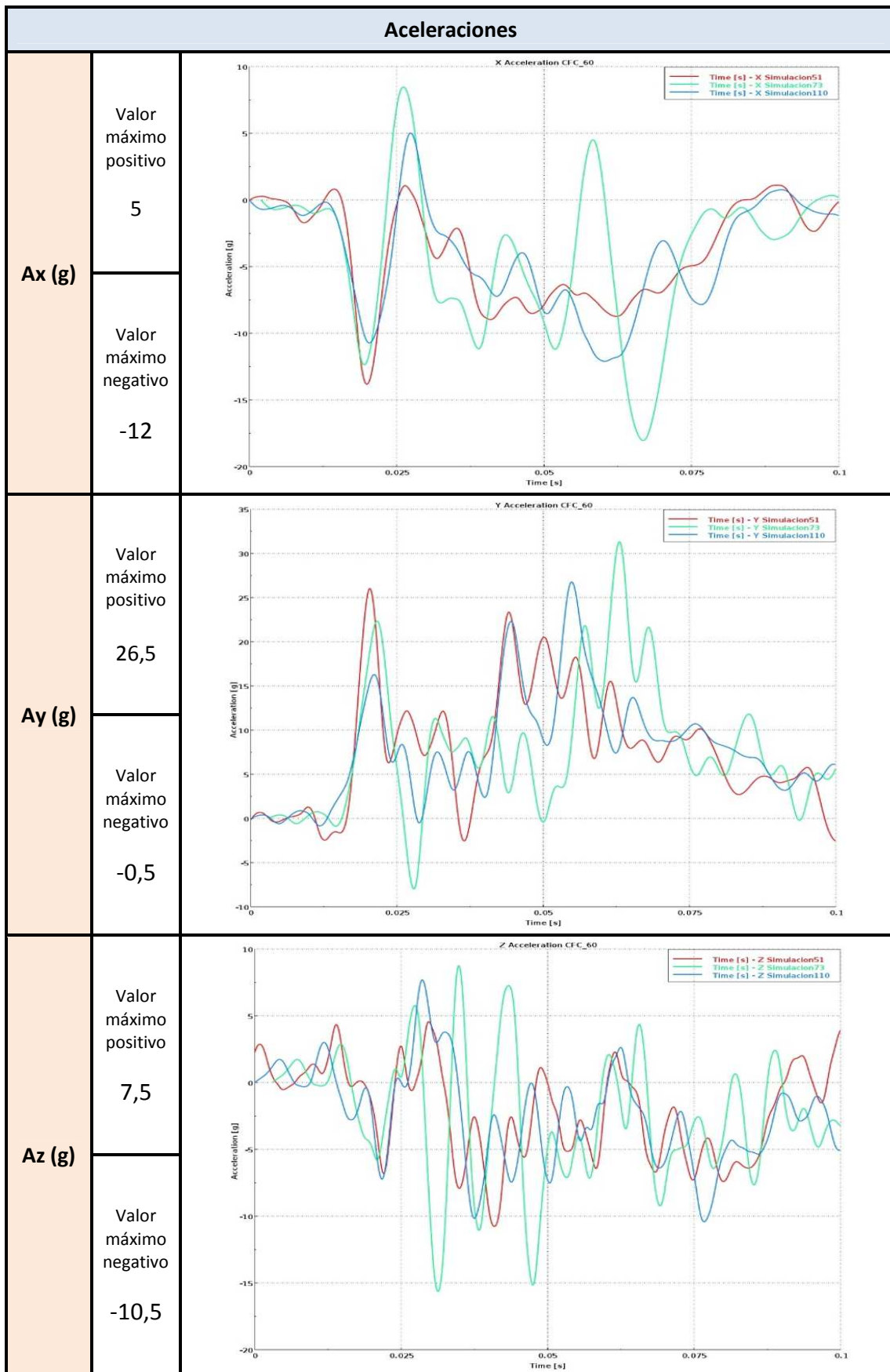


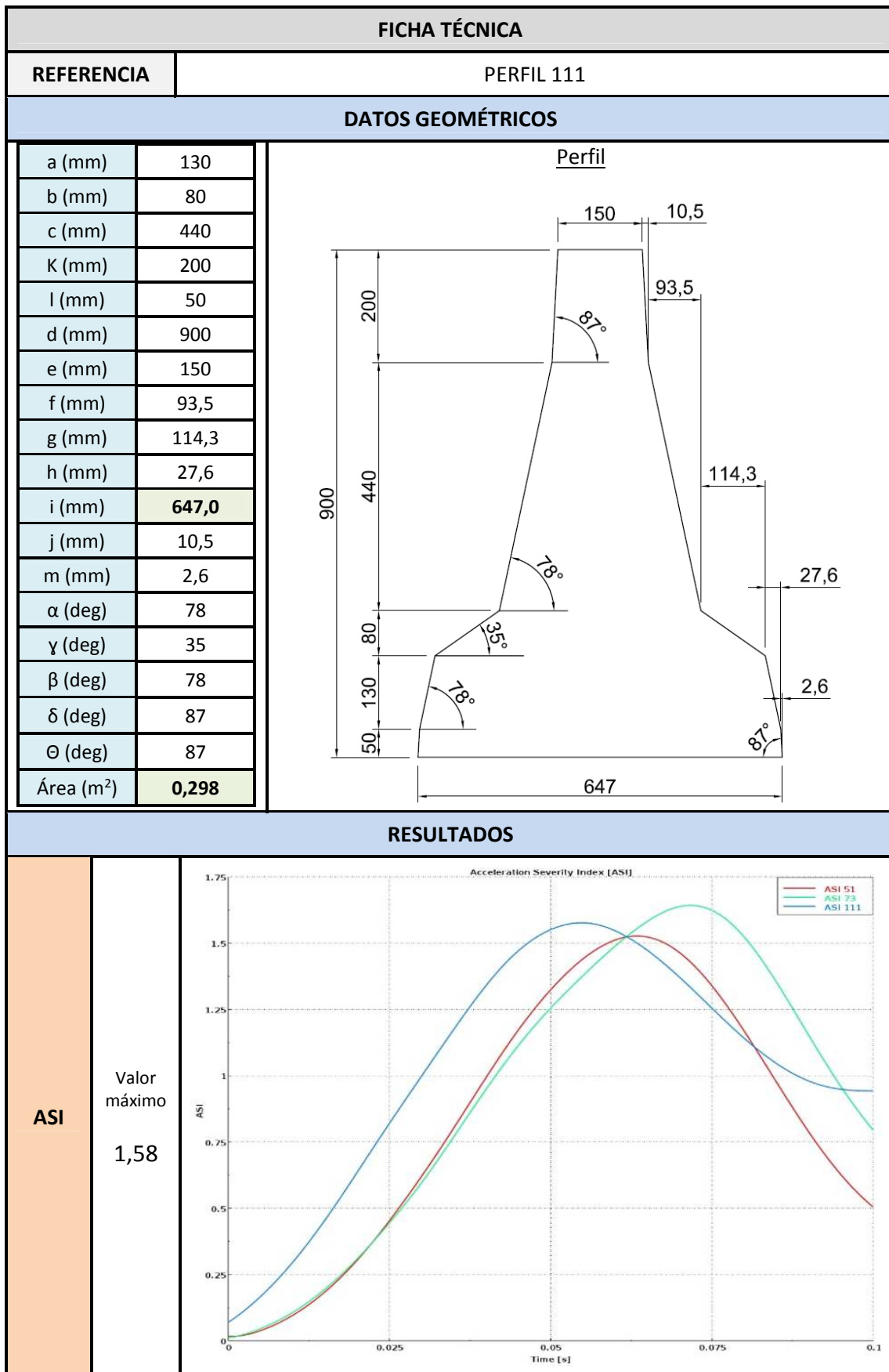


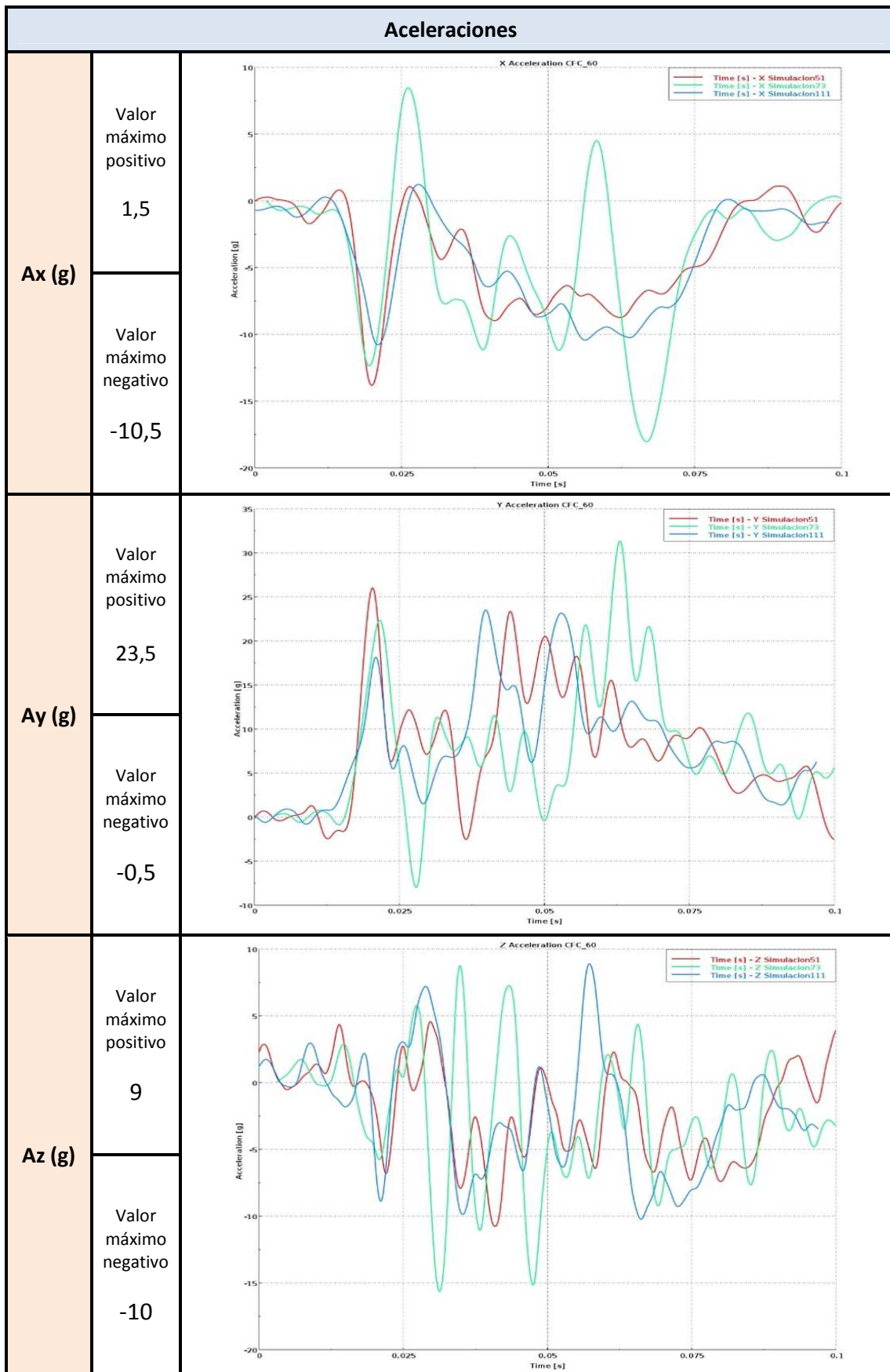
<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo	3
	Valor máximo negativo	-16,5
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo	30,5
	Valor máximo negativo	-4,5
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo	9
	Valor máximo negativo	-14,5

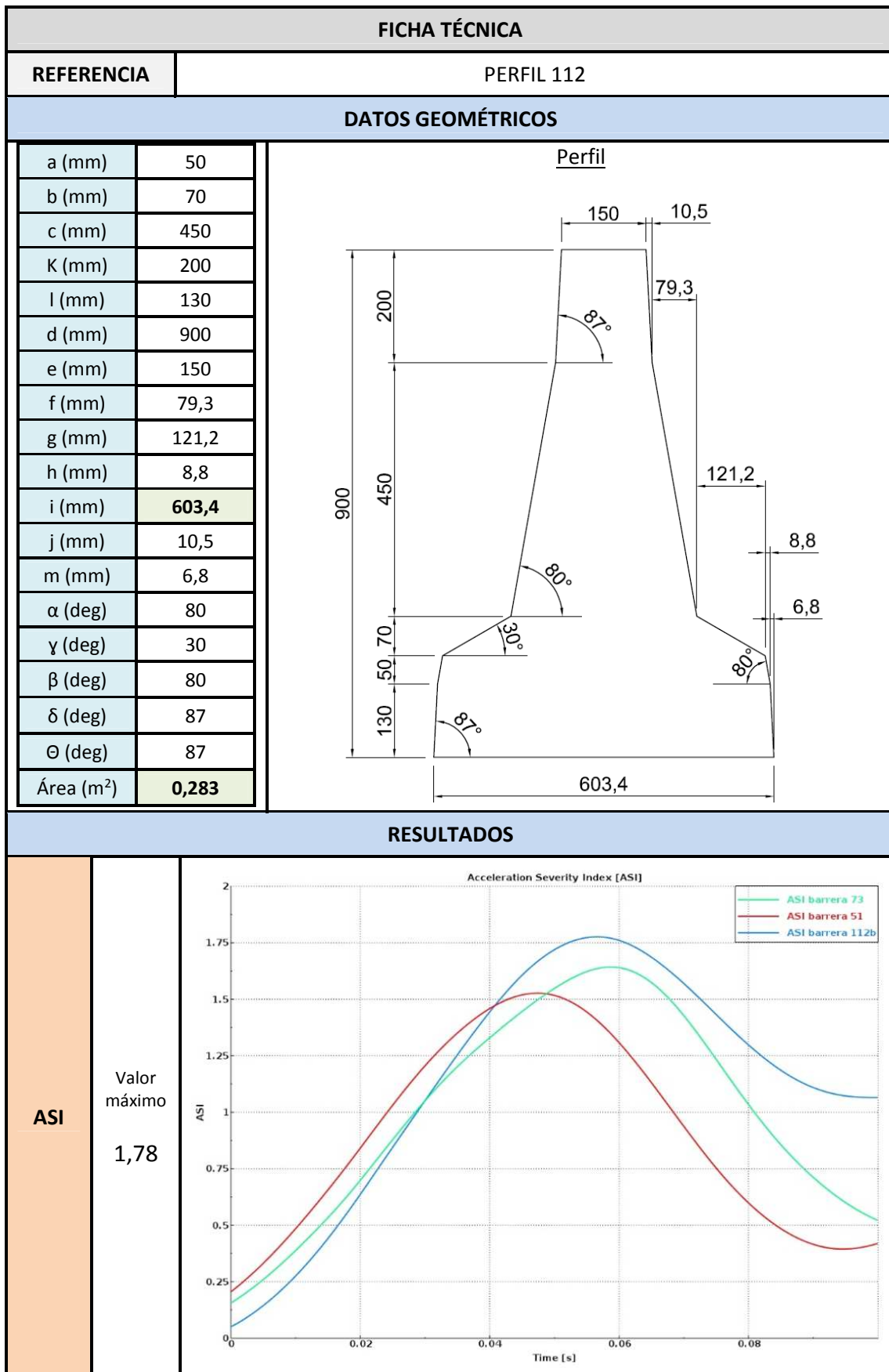


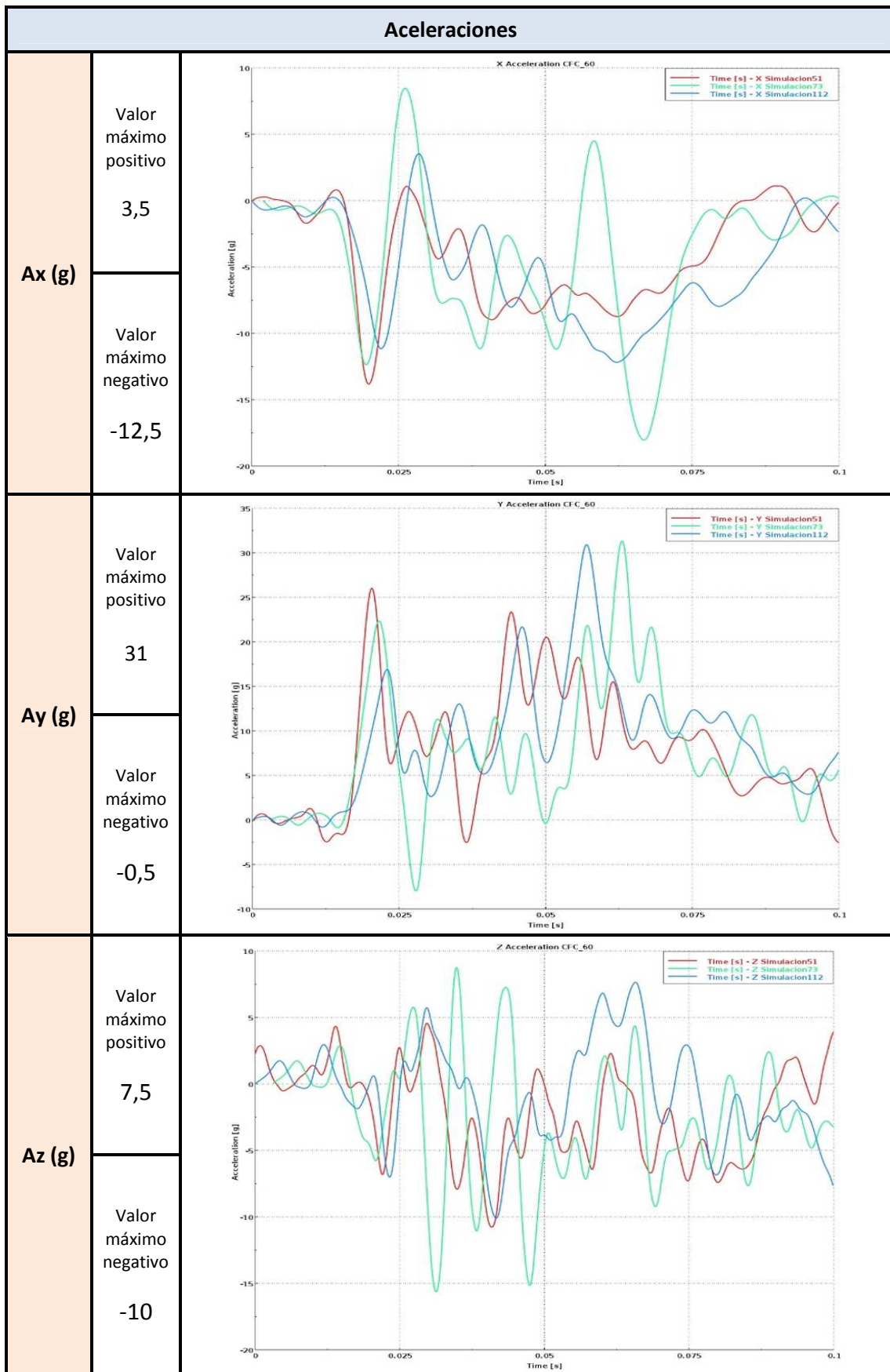


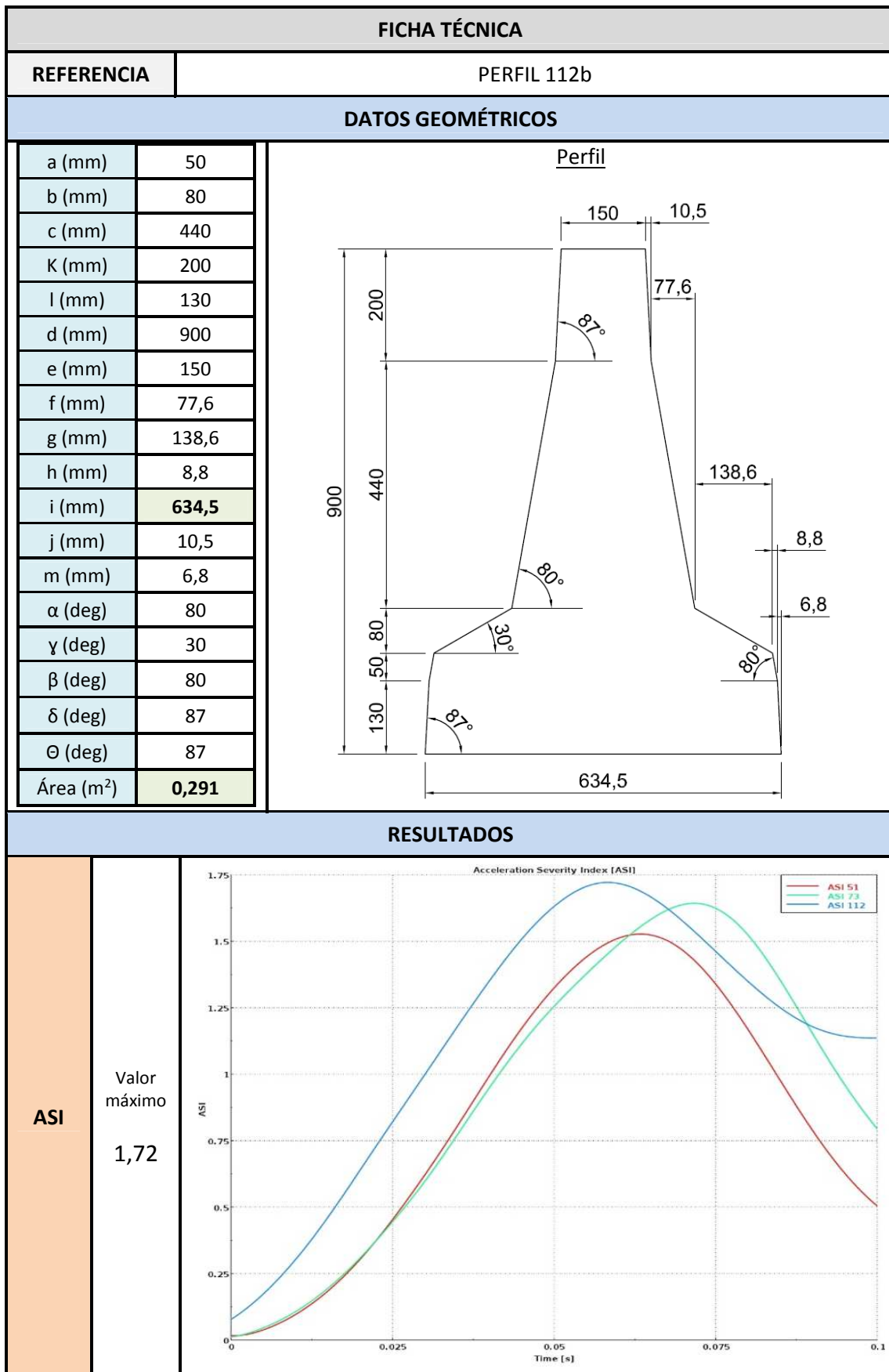




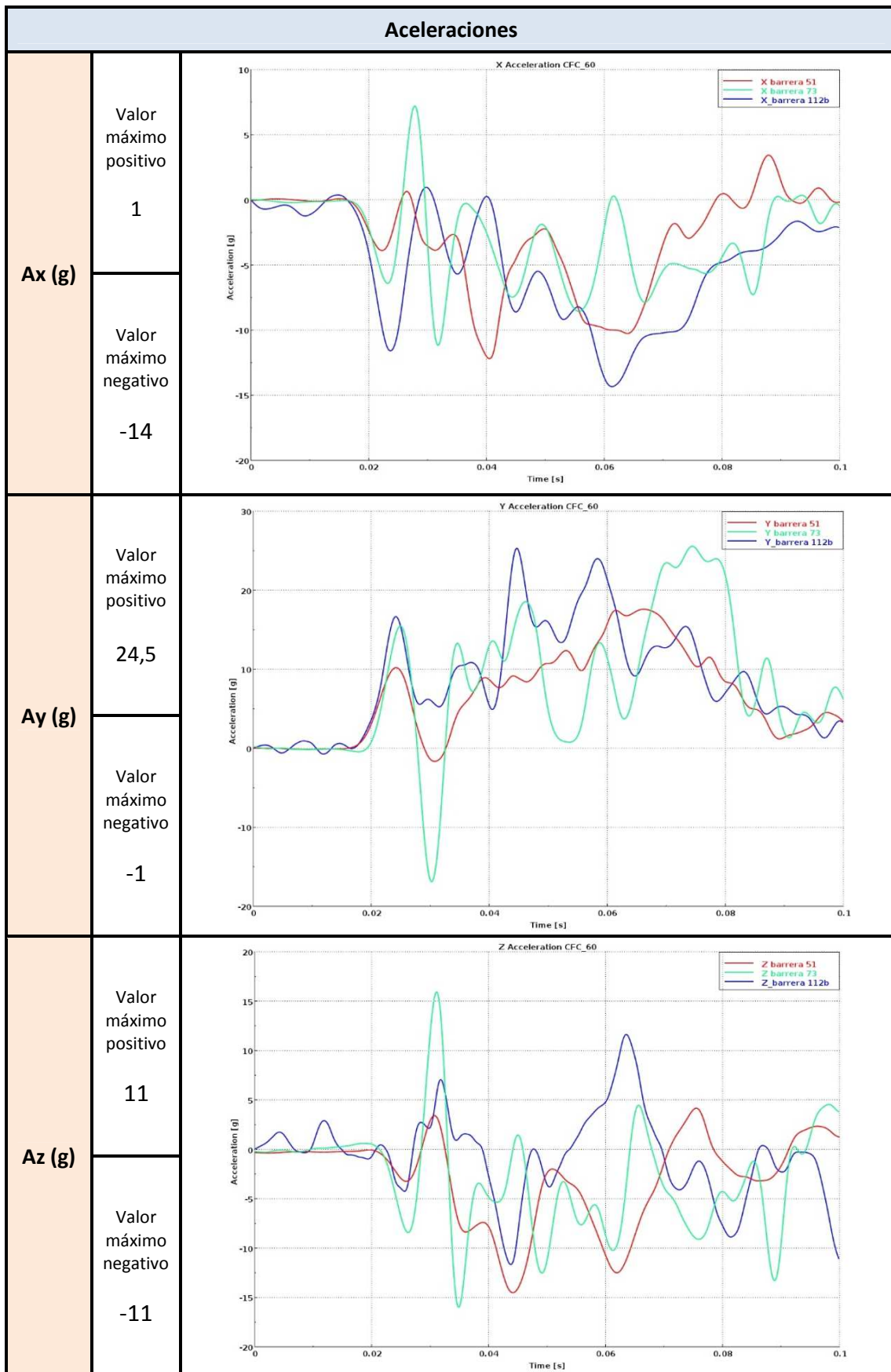


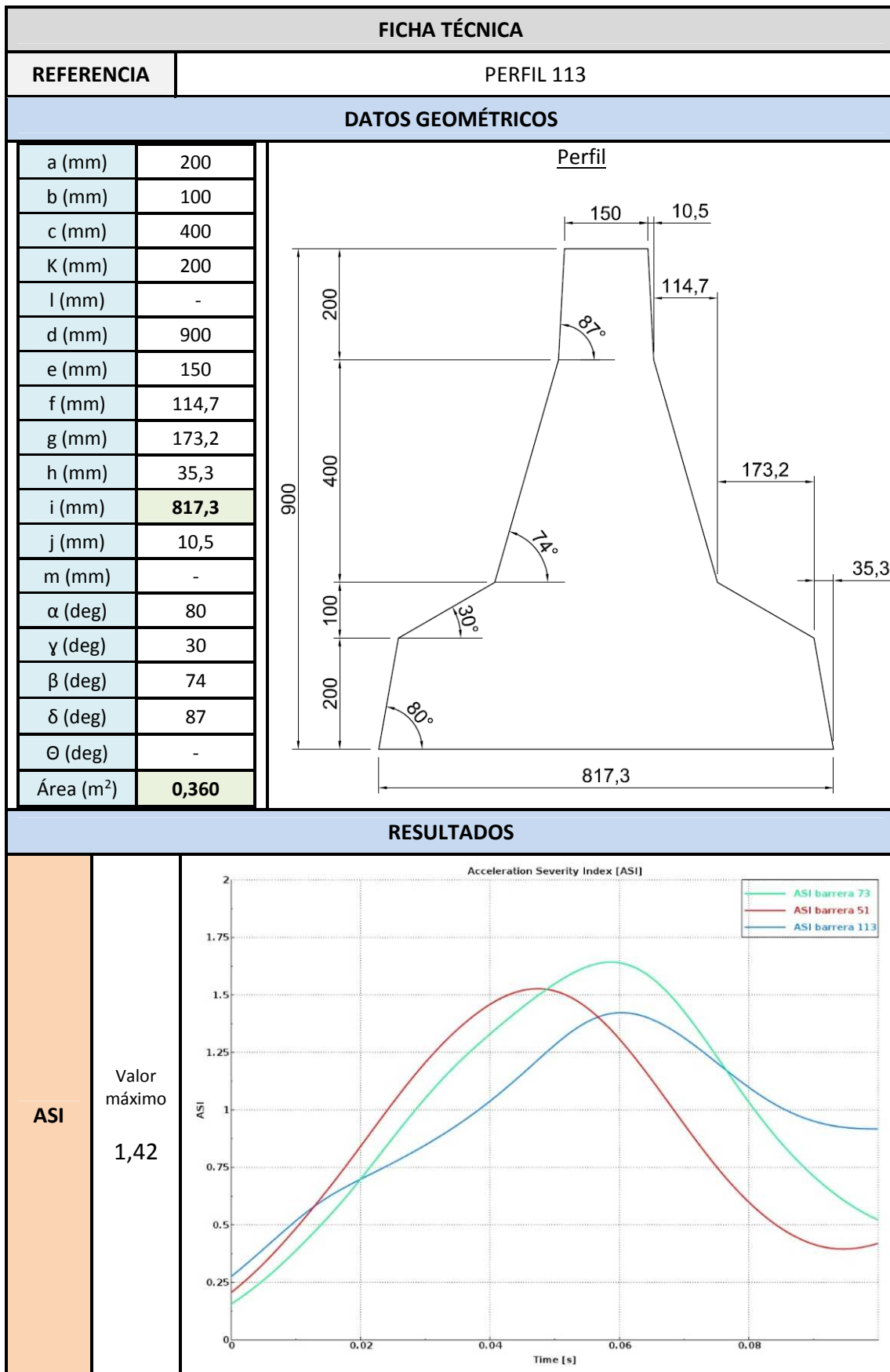


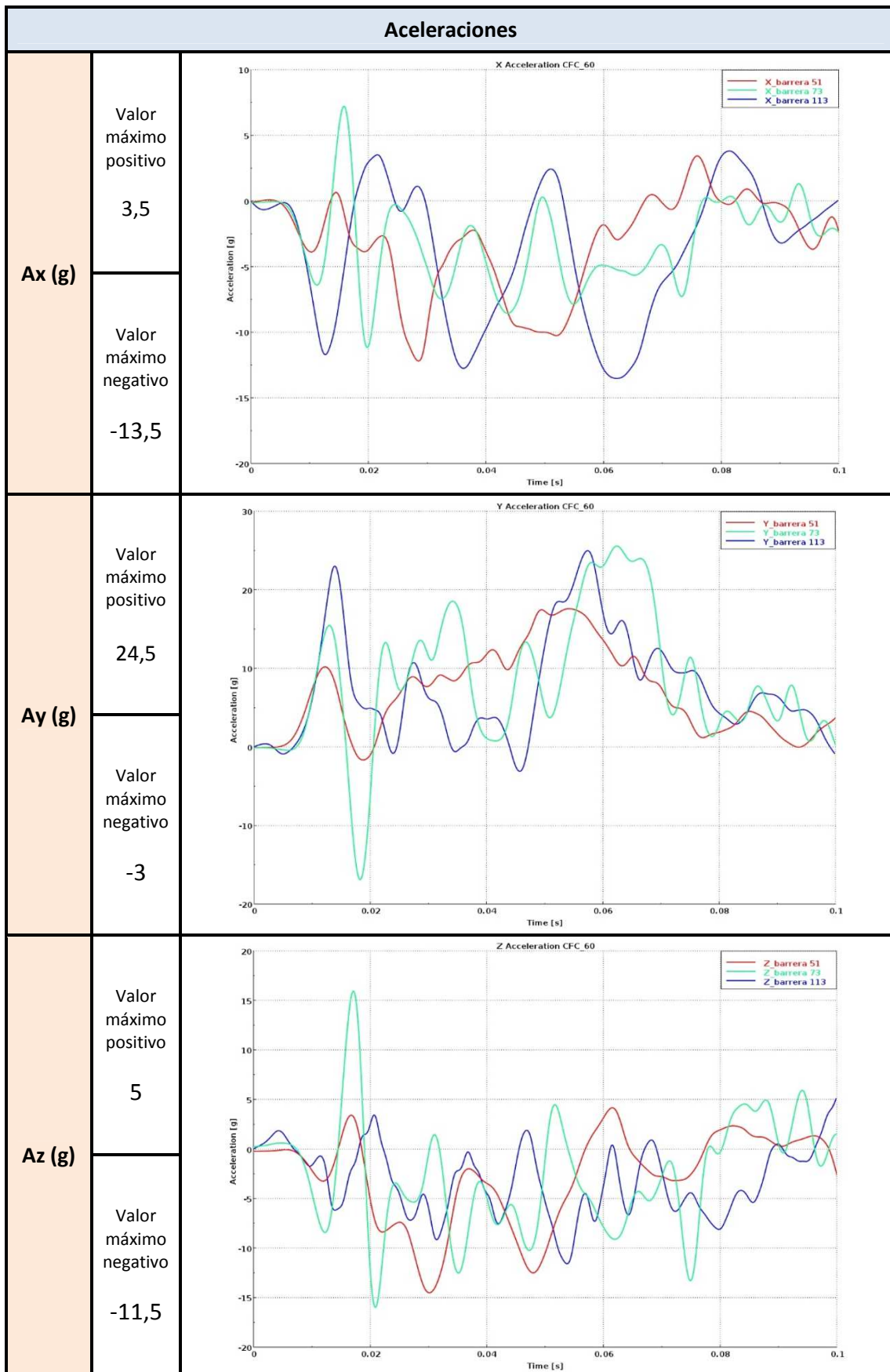


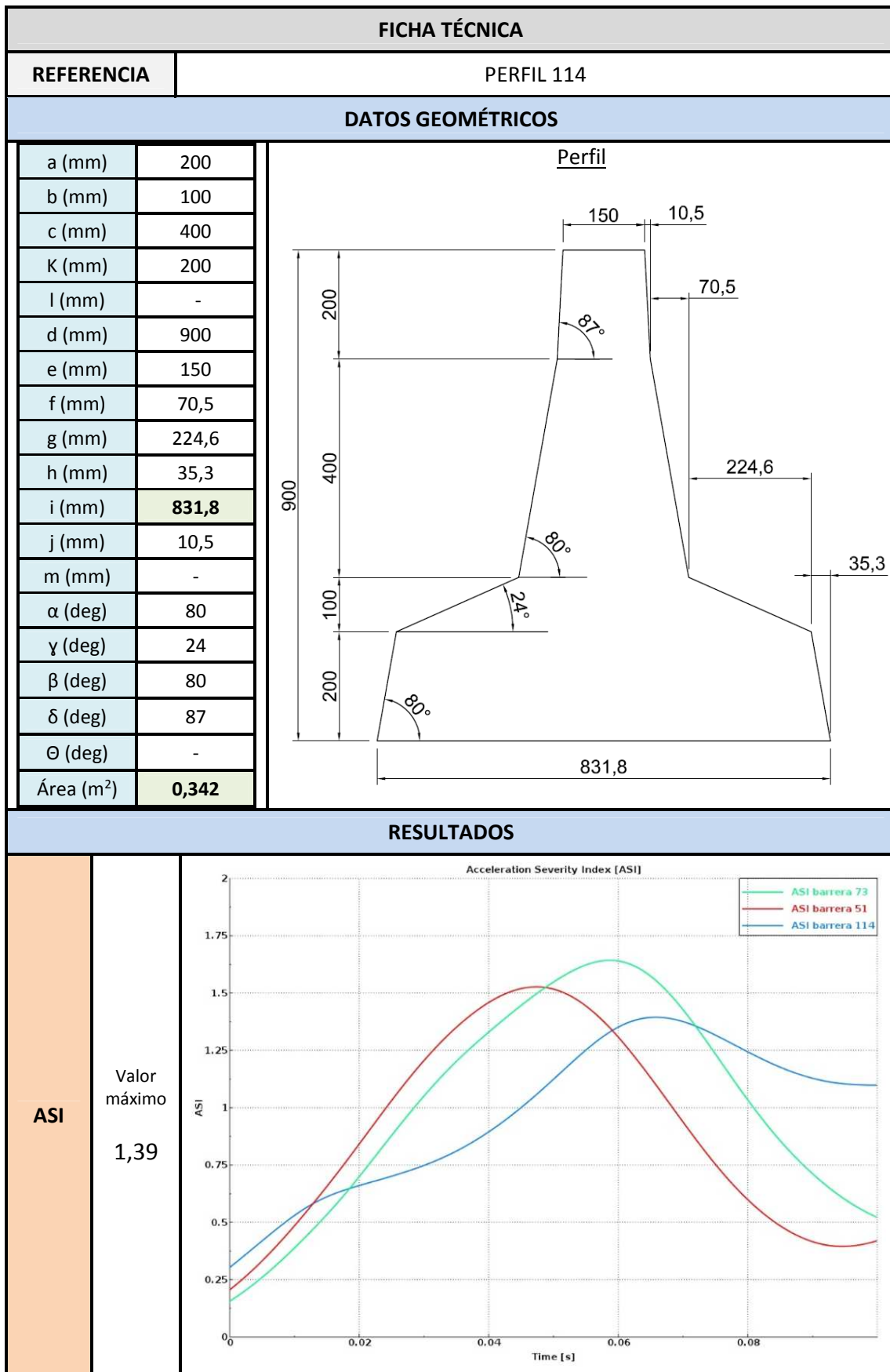




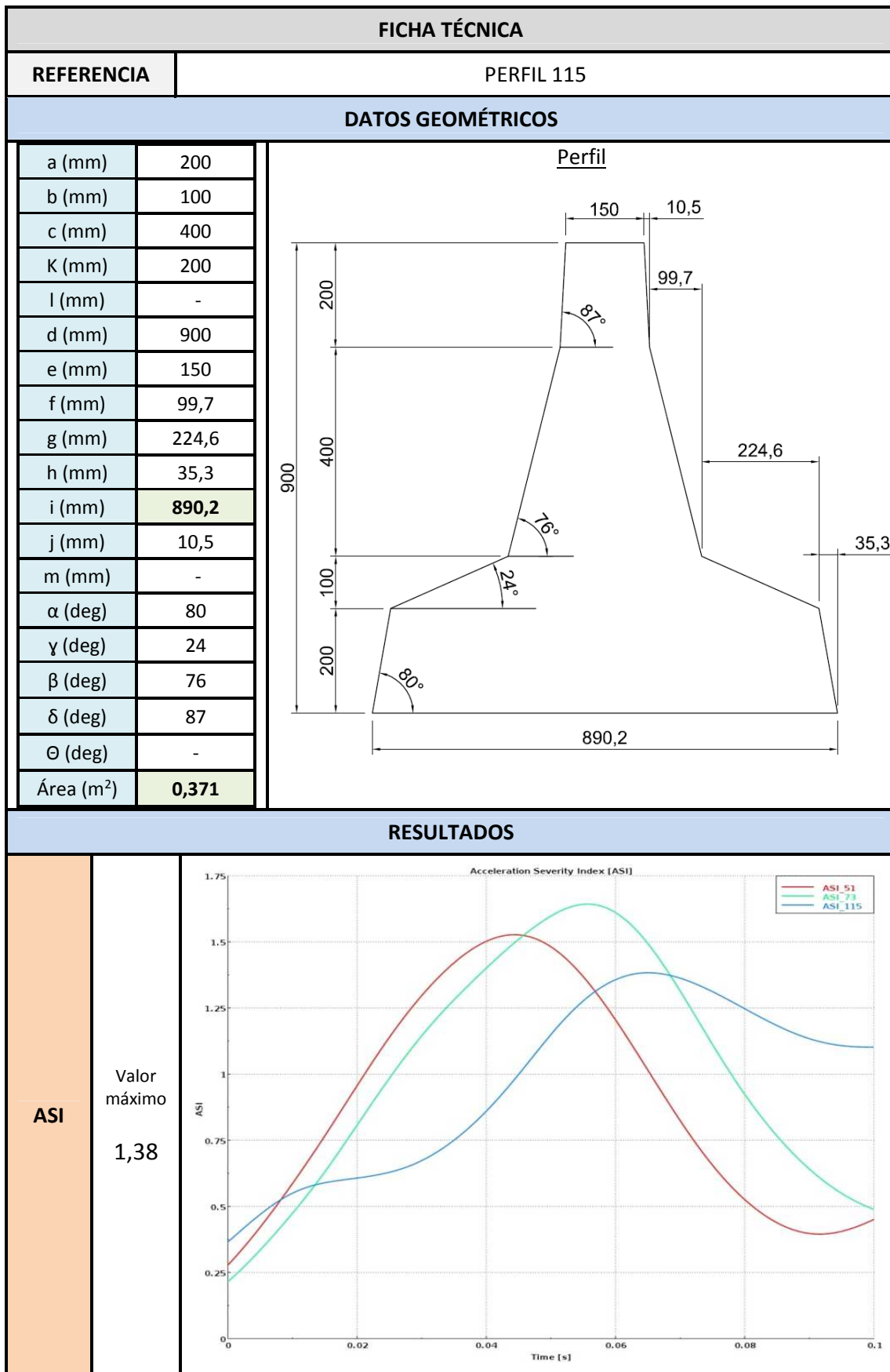


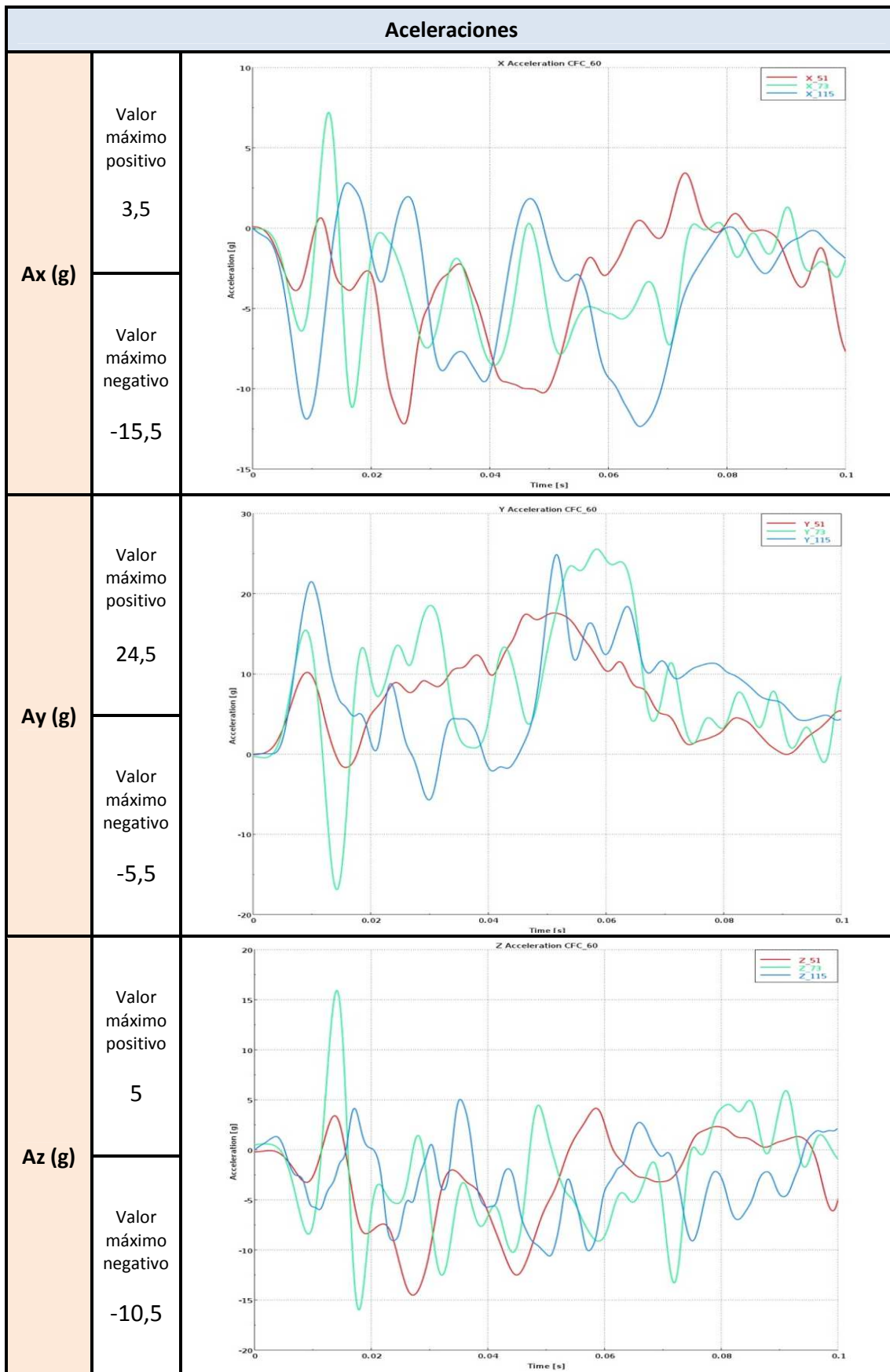






<b>Aceleraciones</b>		
<b>Ax (g)</b>	Valor máximo positivo <b>4</b>	
	Valor máximo negativo <b>-16,5</b>	
<b>Ay (g)</b>	Valor máximo positivo <b>24,5</b>	
	Valor máximo negativo <b>-1</b>	
<b>Az (g)</b>	Valor máximo positivo <b>4</b>	
	Valor máximo negativo <b>-9</b>	





FICHA TÉCNICA		
REFERENCIA	PERFIL 116	
DATOS GEOMÉTRICOS		
a (mm)	200	
b (mm)	100	
c (mm)	400	
K (mm)	200	
l (mm)	-	
d (mm)	900	
e (mm)	150	
f (mm)	70,5	
g (mm)	247,5	
h (mm)	35,3	
i (mm)	<b>877,6</b>	
j (mm)	10,5	
m (mm)	-	
$\alpha$ (deg)	80	
$\gamma$ (deg)	22	
$\beta$ (deg)	80	
$\delta$ (deg)	87	
$\Theta$ (deg)	-	
Área (m <sup>2</sup> )	<b>0,353</b>	
RESULTADOS		
ASI	Valor máximo	
	1,44	

