

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) 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) 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) 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

Estudio experimental y numérico del fallo por inestabilidad de muros de obra de fábrica

tesis doctoral realizada por:
Cristián Sandoval Mandujano

dirigida por:
Pere Roca Fabregat

Barcelona, mayo de 2011

Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria de la Construcció

TESIS DOCTORAL

ACTA DE CALIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

Reunido el tribunal integrado por los abajo firmantes para juzgar la tesis doctoral:

Título de la tesis:

Autor de la tesis:

Acuerda otorgar la calificación de:

- No apto
- Aprobado
- Notable
- Sobresaliente
- Sobresaliente Cum Laude

Barcelona, de de

El Presidente

El Secretario

.....
(nombre y apellidos)

.....
(nombre y apellidos)

El vocal

El vocal

El vocal

.....
(nombre y apellidos)

.....
(nombre y apellidos)

.....
(nombre y apellidos)

Recientemente, mi casa se ha vaciado de plantas y muebles, también de libros: había unos cuantos, no sé si demasiados. Imaginé que viajaba en busca de un viejo anhelo, cobijado durante mis años de lluvia y estudio al sur del mundo. Le conté a mis padres, a mis mejores amigos y a parte de mi familia. No a todos, desde luego. A los más importantes. Hoy son menos, ya no están mi "Negrita", mi Abuelo Daniel y el Tío Chava. Les debo el último beso, aunque llevo la curiosa sensación de haberles alcanzado a decir adiós...

En este camino, como sucede a veces con los buenos libros, disfruté cada palabra y cada sentimiento. Algunos permanecen hasta hoy, junto a mis sueños o dentro de la maleta azul que me acompaña en este viaje. Aquella maleta que aún guarda tu carta, querido papá. Se ha ajado ligeramente por el paso del tiempo, pero sigue ahí. Como tus manos querida mamá, que siempre creo acarician las mías. Se acuerdan? Finalizaba el 2006... No sé cuantas veces la habré leído...

A mis padres, Gladys y Benjamín,

y a mis hermanos, Ivette y Pablo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no sería posible sin el continuo apoyo y aliento de mis padres, Gladys y Benjamín, les quiero mucho. A mis hermanos Ivette y Pablo, a mi sobrino Matías y a mis tíos Samuel, Conchita y Enoc, les quiero y les doy las gracias por permanecer siempre a mi lado. A Claudia, por su apoyo, por haber compartido gran parte de este camino.

Mi eterna gratitud a mi Director de Tesis, Pere Roca, por su valiosa orientación y por todo el soporte económico a lo largo de mi estancia en Barcelona. Estimado Profesor, gracias por su confianza.

Por su calidad humana y por ser como son, quiero agradecer en forma especial a Sergio Cavalaro, Luca Pelà e Izelman Oliveira. Gracias por todo mis buenos amigos. Estoy seguro que la amistad que se ha forjado perdurará a pesar de la distancia física que posiblemente nos separe.

Quisiera agradecer a Álvaro Viviescas y Miguel Lobato por su valiosa ayuda durante mis primeros pasos hacia la obra de fábrica y hacia el uso del DIANA. A Camilo Bernad, Robert Mc-Aloon y Tomás García por su colaboración y acertados consejos a la hora de llevar a cabo la campaña experimental en el LTE.

Quisiera también agradecer a Iván Navarro por su inestimable ayuda durante toda la campaña experimental. Iván, muchas gracias por tu trabajo y por tu sentido de la responsabilidad, espero la vida nos regale la oportunidad de volver a compartir nuevos momentos.

A todos mis compañeros de doctorado en el Departamento de Ingeniería de la Construcción: Ana, André, Albert, Bernat, Betty, Diego, Selma, Oriol, Juliana, Pau, Sandra, Rolando, Edison, Nayara, Felipe, Isaac, Ahmed, Ernest, Carles y a tantos otros. Estarán siempre en mi recuerdo y les reitero mi amistad. A cada uno, que el sol siempre les entibie el rostro, que la lluvia riegue siempre vuestros campos, y hasta que volvamos a vernos, que Dios les guarde en la palma de su mano.

Finalmente, quisiera agradecer a mis amigos Carola, Naim, Virginia, Galo, Rodrigo, Carolina, Gonzalo, José, Harald, Federico, Carlos, Sergio, María Elena. Gracias por la amistad y el constante apoyo en las diversas etapas de este proceso.

RESUMEN

Gran parte del parque edificado en las ciudades españolas y europeas se estructura en base a muros de obra de fábrica de ladrillo. La seguridad estructural de tales construcciones, ante la ocasión de una rehabilitación o de una simple conservación, constituye un motivo de creciente preocupación. En ocasiones, la sola adaptación de este tipo de construcciones a la normativa vigente -que a menudo implica un aumento de las sobrecargas de uso- requiere una evaluación estructural suficientemente precisa que permita a los técnicos tomar medidas de actuación bien fundamentadas. Sin embargo, y a pesar del esfuerzo investigador emprendido en las últimas décadas, los técnicos apenas disponen de criterios y métodos simplificados para la evaluación práctica de los muros.

En este contexto, la presente investigación analiza la respuesta resistente de los muros de obra de fábrica de ladrillo bajo carga vertical centrada y excéntrica. Para ello, la investigación incluye una primera parte destinada a obtener resultados experimentales representativos y fiables sobre la respuesta mecánica de muros de obra de fábrica ante el fallo por inestabilidad lateral. En una segunda parte, la investigación incluye simulaciones numéricas detalladas de una selección de resultados experimentales, incluidos aquellos obtenidos en la presente investigación.

La campaña experimental desarrollada en este estudio incluye ensayos hasta rotura de un conjunto de muros construidos en obra de fábrica de ladrillo a escala 1:4. Un total de 36 muros se ensayan bajo distintas combinaciones de esbeltez y excentricidad de la carga vertical. Los resultados obtenidos son comparados con resultados experimentales previos reportados por otros autores. Dicha comparación se realiza sólo entre resultados con similares condiciones de apoyo y de excentricidad de la carga. Complementariamente a los experimentos llevados a cabo sobre muros, una serie de ensayos normativos de caracterización de materiales y de propiedades medias de la obra de fábrica se llevan a cabo.

Los resultados derivados de los ensayos del programa experimental se utilizan para calibrar y validar un modelo numérico basado en el enfoque de micro-modelización. La aplicación numérica escogida reproduce satisfactoriamente la respuesta última observada en los experimentos, tanto en términos de capacidad resistente como en términos de deformabilidad lateral. Asimismo, los resultados de esta aplicación muestran coherencia con los modos de fallo experimentales.

Sobre la base de un micro-modelo previamente calibrado, la investigación incluye un estudio paramétrico que tiene por objetivo extender los resultados experimentales a un rango más amplio de geometrías, de condiciones de carga y de propiedades materiales. Los resultados obtenidos a partir de este estudio paramétrico permiten, por un lado, evaluar detalladamente la influencia de los principales parámetros que intervienen en el problema de inestabilidad lateral (razón de esbeltez, excentricidad de la carga, rigidez y resistencia a tracción) y, por otro lado, sirven de partida para desarrollar métodos simples para la comprobación y diseño de muros de obra de fábrica de ladrillo.

Los métodos propuestos en esta investigación son funciones obtenidas mediante análisis de regresión. Las funciones encontradas presentan buen ajuste frente a los resultados numéricos del estudio paramétrico, mostrando correlaciones elevadas en todos los casos analizados. Estas funciones -que tienen un enfoque empírico- representan el factor de reducción por esbeltez y excentricidad comúnmente utilizado en diseño estructural de muros de obra de fábrica. Finalmente, la validación de las fórmulas propuestas -3 en total- se realiza frente a resultados experimentales disponibles y resultados calculados empleando otros métodos simples disponibles, incluido el método propuesto en la normativa vigente (EN 1996-1-1:2005).

SUMMARY

A large part of the building stock of the Spanish and European cities consists of load-bearing wall buildings made of brick masonry. The structural safety of such constructions, in the occasion of a rehabilitation or a mere maintenance, is a topic of growing concern. Sometimes, the simple adaptation of this type of constructions to current standards –which often implies an increase of the imposed load considered- requires an accurate structural evaluation permitting the technicians to take adequate decisions. However, despite the research effort undertaken in recent decades, criteria and methods for the practical evaluation of instability problems in masonry walls are still insufficient and not fully accurate.

In this context, this thesis analyzes the resistance response of masonry walls under concentric and eccentric vertical load. For that purpose, the present study includes a first part aimed at obtaining representative and reliable results about the mechanical response of the masonry wall failure by lateral instability. In a second part, systematic numerical simulations are carried out. The numerical tools have been validated using the experimental results obtained previously and others founded in the literature.

The experimental campaign includes a set of walls built on 1:4 scale masonry tested until collapse. A total of 36 walls with different combinations of slenderness ratio and load eccentricity are tested. The results obtained are compared with experimental results reported by other authors. This comparison is only done for results with similar support conditions and load eccentricities. Additionally, a series of measurements and material characterization tests are carried out.

The results derived from the tests performed are used to calibrate and to validate a numerical model based on the micro-modelling approach. This numerical application reproduces satisfactorily the ultimate response observed in the experiments, both in terms of resistance capacity and lateral deformability. In addition, the results of this application show a good agreement with the experimental failure modes.

Based on the micro-model previously calibrated, a parametric study is performed. The aim of the parametric study is to develop more detailed and systematic analyses in order to extend the experimental results to a wider range of geometries, loading conditions and material properties. The numerical results obtained allow the detailed evaluation about the influence of the main parameters regarding the lateral instability problem (slenderness ratio, load eccentricity, stiffness and tensile strength) as well as to propose simple methods for verification and design of brick masonry walls.

The proposed methods involve equations obtained by regression analysis. The functions found present a good agreement with the numerical results from the parametric study, showing a high correlation in all cases. These equations represent the reduction factor for slenderness and eccentricity commonly found in structural design of masonry walls. Finally, the validation of the proposed methods -3 in total- is performed with available experimental evidence and results calculated using others available methods, including the approach proposed in the current standard (EN 1996-1-1:2005).

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Motivación y alcances	2
1.3 Objetivo general	3
1.4 Objetivos específicos	3
1.5 Metodología y contenido	4
2. Estado del Conocimiento	7
2.1 Introducción	7
2.1.1 Objetivos	9
2.1.2 Organización del estudio	9
2.2 La obra de fábrica	10
2.2.1 Generalidades	10
2.2.2 Comportamiento bajo compresión uniaxial	11
2.2.2.1 Criterio de rotura	11
2.2.2.2 Resistencia a compresión	12
2.2.2.3 Relación tensión-deformación bajo compresión	13
2.2.3 Comportamiento a tracción uniaxial	15
2.2.3.1 Criterio de rotura	15
2.2.3.2 Resistencia a tracción	17
2.2.3.3 Energía de fractura en modo I	17
2.3 Estabilidad de muros de obra de fábrica	19
2.3.1 Condiciones de carga y apoyo	19
2.3.2 Soluciones teóricas	20
2.3.3 Simulaciones mediante MEF	24
2.4 Métodos simples	26
2.4.1 Métodos y criterios simples	27
2.4.1.1 Método propuesto por Morton (1990)	27
2.4.1.2 Método propuesto por Knutsson (1991)	29
2.4.1.3 Método propuesto por Glock y Graubner (2003)	31
2.4.1.4 Método propuesto por Lu (2003)	33
2.4.2 Métodos normativos	34
2.4.2.1 Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005)	35
2.4.2.2 ACI 530 (MSJC, 2005)	36

2.5	Investigaciones experimentales previas	37
2.5.1	Hasan y Hendry (1976)	37
2.5.2	Watstein y Allen (1970)	40
2.5.3	Kirtschig y Anstötz (1991)	43
2.5.5	Fattal y Cattaneo (1976)	44
2.5.6	Structural clay products research foundation (1965)	46
2.6	Estrategias de modelización numérica	48
2.6.1	Macro-modelización	48
2.6.2	Micro-modelización	49
2.7	Discusión	50
3.	Campaña Experimental	53
3.1	Introducción	53
3.1.1	Objetivos	54
3.1.2	Organización del estudio	55
3.2	Caracterización de los materiales	55
3.2.1	Piezas	55
3.2.2	Micro-mortero	58
3.2.3	La obra de fábrica	59
3.2.3.1	Resistencia a compresión	60
3.2.3.2	Resistencia a tracción	62
3.3	Procedimiento de ensayo sobre paredes	64
3.3.1	Descripción del programa	64
3.3.2	Proceso constructivo	66
3.3.3	Equipos e instrumentación	68
3.4	Resultados experimentales	69
3.4.1	Tensiones de rotura	69
3.4.2	Diagramas tensión-desplazamiento y tensión-deflexión lateral	71
3.4.3	Modos de rotura	75
3.5	Cálculos usando Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005)	80
3.6	Discusión	80
4.	Simulación Numérica	83
4.1	Introducción	83
4.1.1	Objetivos	84
4.1.2	Organización del estudio	84
4.2	Enfoque numérico adoptado	84
4.2.1	Formulación del modelo	85

4.2.2 Configuración adoptada	87
4.2.3 Parámetros elásticos e inelásticos	88
4.3 Comparación entre resultados experimentales y numéricos	91
4.3.1 Presente investigación	91
4.3.2 Otras campañas	95
4.3.2.1 Simulación de los ensayos de Kirtschig y Anstötz (1991)	96
4.3.2.2 Simulación de los ensayos de Hasan y Hendry (1976)	99
4.3.2.3 Simulación de los ensayos de Watstein y Allen (1970)	101
4.4 Discusión	104
5. Estudio Paramétrico	105
5.1 Introducción	105
5.1.1 Objetivos	106
5.1.2 Organización del estudio	106
5.2 Definición de parámetros	106
5.2.1 Parámetros geométricos	107
5.2.2 Parámetros materiales	108
5.2.3 Parámetros del modelo de interface compuesta	109
5.3 Análisis de resultados	111
5.3.1 Influencia de la razón de esbeltez (h/t)	112
5.3.2 Influencia de la deformabilidad (E/f_c)	113
5.3.3 Influencia de la excentricidad de la carga (e/t)	115
5.3.4 Influencia de la resistencia a tracción (f_t/f_c)	117
5.4 Discusión	119
6. Propuestas para determinar factores de reducción	123
6.1 Introducción	123
6.1.1 Objetivos	124
6.1.2 Organización del estudio	124
6.2 Procedimiento de trabajo	124
6.3 Propuestas para determinar factores de reducción	126
6.3.1 Planteamiento general	126
6.3.2 Propuesta #1	127
6.3.2.1 Formulación	127
6.3.2.2 Contrastación frente a resultados numéricos	128
6.3.3 Propuesta #2	129
6.3.3.1 Formulación	129
6.3.3.2 Contrastación frente a resultados numéricos	129

6.3.4 Propuesta #3	130
6.3.4.1 Formulaci3n	130
6.3.4.2 Contrastaci3n frente a resultados numéricos	131
6.3.5 Efecto de la resistencia a tracci3n	131
6.4 Verificaci3n frente a resultados experimentales	133
6.4.1 Presente investigaci3n	134
6.4.2 Hasan y Hendry (1976)	135
6.4.3 Kirtschig y Anst3tz (1991)	136
6.4.4 Otras campa1as	137
6.5 Discusi3n	139
7. Conclusiones	141
7.1 Conclusiones generales	141
7.2 Conclusiones específcas	142
7.2.1 Conclusiones relativas al estado del conocimiento	142
7.2.2 Conclusiones relativas a la campa1a experimental	143
7.2.3 Conclusiones relativas a la simulaci3n numérica	143
7.2.4 Conclusiones relativas al estudio paramétrico	144
7.2.4 Conclusiones relativas a las propuestas para determinar factores de reducci3n	144
7.3 Líneas futuras de investigaci3n	145
Referencias	147
Anexos	
A Simulaciones mediante macro-modelizaci3n	153
B Cálculos utilizando métodos simples	161
Apéndices	
A Tabla: Resultados numéricos generales	167
B Tabla: Incremento del factor de reducci3n $\Delta\Phi$ debido a la resistencia a tracci3n	187

Índice de Figuras

<i>Figura 1.1 – Metodología general de trabajo</i>	5
<i>Figura 2.1 – Tensión de rotura en paredes de carga de obra de fábrica vs razón de esbeltez (basada en Morton, 1990)</i>	8
<i>Figura 2.2 – Enfoques para resolver el problema de estabilidad en paredes de obra de fábrica</i>	8
<i>Figura 2.3 - Diferentes leyes de traba o aparejos: a) americano; b) inglés; c) flamenco; d) liso; y e) trabado</i>	10
<i>Figura 2.4 - Estado de tensiones en la unidad y en el mortero bajo compresión uniaxial</i>	11
<i>Figura 2.5 – Relaciones tensión-deformación usualmente empleadas en obra de fábrica</i>	13
<i>Figura 2.6 - Influencia de la orientación de los tendeles en el comportamiento tenso-deformacional de la fábrica (adaptada de Samarasinghe et al., 1982)</i>	14
<i>Figura 2.7 - Modos de fallo de la obra de fábrica de ladrillos macizos cerámicos bajo compresión uniaxial (Page, 1983)</i>	15
<i>Figura 2.8 - Modos de fallo de la obra de fábrica de ladrillos macizos cerámicos bajo tracción uniaxial (Page, 1983)</i>	16
<i>Figura 2.9 - Curvas tensión-desplazamiento para tensiones de tracción uniaxial (σ) en la dirección paralela a las juntas horizontales (Backes, 1985)</i>	16
<i>Figura 2.10 – Variación de la adhesión unidad-mortero con el contenido de humedad de las unidades al momento de la puesta en obra (Sinha, 1967; citado por Hendry, 1990)</i>	16
<i>Figura 2.11 – Superficie neta de contacto para probetas de unidades macizas de arcilla bajo tracción directa encontradas por Van der Pluijm (1999)</i>	17
<i>Figura 2.12 - Comportamiento de la adherencia a tracción: a) ensayo a tracción directa; b) típica curva tensión-desplazamiento para fábrica de ladrillo macizo de arcilla</i>	18
<i>Figura 2.13 – Relación entre resistencia a tracción y energía de fractura en modo I para probetas construidas con unidades macizas de arcilla (basada en Van der Pluijm, 1997)</i>	18
<i>Figura 2.14 – Configuraciones de carga y condición de apoyo consideradas en diversos estudios de estabilidad de paredes de obra de fábrica disponibles en la literatura. En las figuras h es la altura y t el espesor de la pared</i>	20
<i>Figura 2.15 – Esquema general del problema</i>	21
<i>Figura 2.16 – Teoría de Angervo (1954): a) ley tensión-deformación empleada; b) resultados obtenidos representados gráficamente</i>	22
<i>Figura 2.17 – Teoría de Kukulski y Lugez (1966): a) ley tensión-deformación empleada; b) resultados obtenidos representados gráficamente</i>	23
<i>Figura 2.18 – Modelo de un muro soportado en su base y en sus bordes verticales sometido a carga fuera del plano (Martini, 1998)</i>	24
<i>Figura 2.19 – Modelación mediante MEF realizada por Martini (1998) de los casos de estudio considerados por a) La Mendola et al. (1995) y b) Yokel (1971)</i>	25
<i>Figura 2.20 – Resultados reportados por Lu (2003) para paredes de esbeltez 30: a) influencia de la excentricidad de la carga, b) influencia de la resistencia a tracción</i>	26
<i>Figura 2.21 – Enfoque empleado en el método de Morton (1990)</i>	27
<i>Figura 2.22 – Factores de reducción basados en el método de Morton (1990)</i>	29
<i>Figura 2.23 – Distribución rectangular de la tensión alrededor de la resultante</i>	30

<i>Figura 2.24 - a) Variación del factor k_s calculado de acuerdo a la ecuación 2.30 para diferentes valores de k_r; b) Factores de reducción obtenidos de acuerdo con el método de Knutsson (1991)</i>	31
<i>Figura 2.25 - a) Curva σ-ε para $k_o = 2.0$ y $\varepsilon_f = 0.0025$; b) Factores de reducción obtenidos de acuerdo con el método de Glock y Graubner (2003)</i>	33
<i>Figura 2.26 - Factores de reducción obtenidos de acuerdo con el método de Lu (2003) considerando una relación $E/f_c = 700$ para: a) resistencia a tracción nula, y b) $f_t/f_c = 8\%$</i>	34
<i>Figura 2.27 - Factores de reducción Φ_m para diferentes excentricidades obtenidos de acuerdo con Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) para una relación $E = 700f_c$</i>	36
<i>Figura 2.28 - Configuración ensayo llevado a cabo por Hasan & Hendry (1976)</i>	39
<i>Figura 2.29 - Tensión de compresión contra razón de esbeltez (basada en Hasan y Hendry, 1976)</i>	40
<i>Figura 2.30 - Configuración de los ensayos de Watstein y Allen (1970): a) esquema de carga y apoyo; b) vista de una pared lista para ensayar</i>	41
<i>Figura 2.31 - Tensión de compresión contra razón de esbeltez (basada en Watstein y Allen, 1970)</i>	42
<i>Figura 2.32. Relación entre la tensión de compresión promedio y el valor pico de las deflexiones laterales para a) $e=t/6$ y b) $e=t/3$ (basada en Watstein y Allen, 1970)</i>	42
<i>Figura 2.33 - Configuración de los ensayos de Kirtschig y Anstötz (1991)</i>	43
<i>Figura 2.34 - Tensión de compresión contra razón de esbeltez (basada en Kirtschig y Anstötz, 1991)</i>	44
<i>Figura 2.35 - Tensión de compresión contra razón de esbeltez (basada en Fattal y Cattaneo, 1976)</i>	45
<i>Figura 2.36 - Gráfica tensión de compresión vs razón de esbeltez (basada en SCPRF, 1965)</i>	47
<i>Figura 2.37 - a) Micromodelo detallado; b) Micromodelo simplificado (Lourenço, 1996)</i>	49
<i>Figura 3.1 - Dimensiones de las piezas a escala 1:4</i>	55
<i>Figura 3.2 - Ensayos sobre piezas: a) a compresión; b) a flexo-tracción</i>	57
<i>Figura 3.3 - Ensayos sobre probetas de micro-mortero endurecido: a) a compresión; b) a flexo-tracción</i>	59
<i>Figura 3.4 - Geometría para ensayos a compresión uniaxial</i>	60
<i>Figura 3.5 - Compresión uniaxial simple: a) configuración ensayo; b) modo de rotura típico</i>	61
<i>Figura 3.6 - Equipamiento para ensayo a tracción directa</i>	62
<i>Figura 3.7 - Ensayo a tracción directa: a) dimensiones de la probeta; b) esquema de ensayo</i>	63
<i>Figura 3.8 - Superficies de adherencia en probetas a tracción</i>	64
<i>Figura 3.9 - Geometría de las paredes y configuración del ensayo</i>	65
<i>Figura 3.10 - Pared de esbeltez 25.6 lista para ensayar: a) vista frontal, b) vista lateral</i>	66
<i>Figura 3.11 - Proceso constructivo de las paredes</i>	67
<i>Figura 3.12 - Prensa INSTRON</i>	68
<i>Figura 3.13 - Transductores y sensor láser empleado en los ensayos</i>	69
<i>Figura 3.14 - Cámara de alta velocidad: a) equipo; b) vista panorámica</i>	69
<i>Figura 3.15 - Representación gráfica de los resultados experimentales</i>	70
<i>Figura 3.16 - Relación experimental σ/f_c contra la esbeltez para a) $e=0$, b) $e=t/6$ y c) $e=t/3$</i>	71
<i>Figura 3.17 - Diagramas tensión-desplazamiento vertical para excentricidad nula: a) serie W6; b) serie W12</i>	72
<i>Figura 3.18 - Diagramas tensión-desplazamiento vertical para excentricidad $e=t/6$: a) serie W6; b) serie W12</i>	72

<i>Figura 3.19 - Diagramas tensión–desplazamiento vertical para excentricidad $e=t/3$: a)serie W6; b)serie W12</i>	73
<i>Figura 3.20 - Diagramas tensión – deflexión lateral para la serie W18: a)$e=0$;b)$e=t/6$;c)$e=t/3$; d)agrupadas</i>	73
<i>Figura 3.21 - Diagramas tensión – deflexión lateral para la serie W25: a)$e=0$;b)$e=t/6$;c)$e=t/3$;d) agrupadas</i>	74
<i>Figura 3.22 - Diagramas tensión – deflexión lateral de acuerdo con la excentricidad de la carga: a)$e=t/6$; b)$e=t/3$</i>	75
<i>Figura 3.23 – Modos experimentales de rotura para $e=0$: a) serie W6; b) serie W12</i>	76
<i>Figura 3.24 – Modo experimental de rotura para $e=t/3$, serie W12</i>	76
<i>Figura 3.25 – Secuencia de rotura para una pared de esbeltez 18.7 y excentricidad nula</i>	77
<i>Figura 3.26 – Secuencia de rotura para una pared de esbeltez 25.6 y excentricidad $e=t/6$</i>	78
<i>Figura 3.27 – Secuencia de rotura para una pared de esbeltez 25.6 y excentricidad $e=t/3$</i>	79
<i>Figura 3.28 – Comparación entre Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) y tensiones experimentales últimas promedio: a) presente investigación; b) Kirtschig y Anstötz, 1991, c) Hasan y Hendry, 1976; d) Watstein y Allen, 1970</i>	81
<i>Figura 4.1 - Estrategia para la micro-modelización simplificada (adaptada de Lourenço y Rots; 1997)</i>	85
<i>Figura 4.2 – Modelo de interface compuesta (Lourenço y Rots, 1997)</i>	85
<i>Figura 4.3 – Modelo de interface compuesta: a) Comportamiento en tracción (modo I); b) Comportamiento en corte (modo II) (Lourenço, 1996b)</i>	86
<i>Figura 4.4 – Modelo de interface compuesta. Comportamiento en compresión</i>	87
<i>Figura 4.5 – Elementos finitos empleados en la presente investigación: a) elemento de 8 nodos para las unidades; b) elementos de 6 nodos para las interfaces</i>	87
<i>Figura 4.6 – Configuración y mallado típico utilizado en las simulaciones</i>	88
<i>Figura 4.7 – a) Micro-modelo probeta; b) Diagrama σ-ϵ experimental (en duplicado) y numérico</i>	89
<i>Figura 4.8 – Comparación entre tensión última (σ) numérica y experimental: a) $e=0$; b) $e=t/6$; c) $e=t/3$; y d) agrupadas</i>	92
<i>Figura 4.9 – Diagramas tensión-deflexión lateral: a) esbeltez 18.7; b) esbeltez 25.6.</i>	92
<i>Figura 4.10 – Esbeltez 6.8: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada</i>	93
<i>Figura 4.11 - Esbeltez 12.6: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada</i>	93
<i>Figura 4.12 - Esbeltez 18.7: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada</i>	94
<i>Figura 4.13 - Esbeltez 25.6: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada</i>	94
<i>Figura 4.14 – Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y apertura de juntas (interfaces) representadas sobre la forma deformada para el modelo de esbeltez 18.7 y excentricidad: a) $e=t/6$, y b) $e=t/3$</i>	95
<i>Figura 4.15 – Comparación entre capacidad última numérica y experimental. Campaña experimental de Kirtschig y Anstötz (1991)</i>	96
<i>Figura 4.16 - Esbeltez 5.6: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada</i>	97
<i>Figura 4.17 - Esbeltez 11.1: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada</i>	97
<i>Figura 4.18 - Esbeltez 18.8: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada</i>	98
<i>Figura 4.19 - Esbeltez 27.7: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada</i>	98
<i>Figura 4.20 - Comparación entre capacidad última numérica y experimental. Campaña experimental de Hasan y Hendry (1976)</i>	99

<i>Figura 4.21 - Esbeltez 6: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada</i>	99
<i>Figura 4.22 - Esbeltez 12: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada</i>	100
<i>Figura 4.23 - Esbeltez 18: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada</i>	100
<i>Figura 4.24 - Esbeltez 25: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada</i>	101
<i>Figura 4.25 - Comparación entre capacidad última numérica y experimental. Campaña experimental de Watstein y Allen (1970)</i>	101
<i>Figura 4.26 - Esbeltez 12.4: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada.</i>	102
<i>Figura 4.27 - Esbeltez 22.8: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada.</i>	102
<i>Figura 4.28 - Esbeltez 32.0: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada.</i>	103
<i>Figura 4.29 - Esbeltez 42.5: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada.</i>	103
<i>Figura 4.30 - Curvas tensión-deflexión lateral. Comparación entre resultados experimentales y numéricos para Watstein y Allen (1970).</i>	104
<i>Figura 5.1 - Razones de esbeltez consideradas en el estudio paramétrico</i>	107
<i>Figura 5.2 - Excentricidades consideradas en el estudio paramétrico</i>	108
<i>Figura 5.3 - Influencia de la razón de esbeltez sobre la capacidad de carga</i>	113
<i>Figura 5.4 - Influencia de la relación E/f_c sobre la capacidad de carga</i>	114
<i>Figura 5.5 - Relación entre la compresión normalizada y el parámetro adimensional $\bar{\lambda}$, para casos con resistencia a tracción nula.</i>	115
<i>Figura 5.6 - Influencia de la excentricidad de la carga para $E = 215f_c$</i>	116
<i>Figura 5.7 - Influencia de la excentricidad de la carga para $E = 900f_c$</i>	117
<i>Figura 5.8 - Influencia de la resistencia a tracción sobre la capacidad de carga</i>	118
<i>Figura 5.9 - Influencia de la resistencia a tracción. Relación entre la tensión normalizada y la deflexión lateral para un elemento de esbeltez 23 y relación $E = 900f_c$</i>	119
<i>Figura 5.10- Influencia de la razón de esbeltez y la deformabilidad sobre la capacidad de carga para diferentes excentricidades.</i>	120
<i>Figura 5.11 - Influencia del parámetro $\bar{\lambda}$ y la excentricidad de la carga sobre la capacidad de carga. Curvas para resistencia a tracción nula.</i>	121
<i>Figura 6.1 - Procedimiento de trabajo para validar nuevas propuestas</i>	125
<i>Figura 6.2 - Curvas de ajuste: a) parámetro A, b) parámetro B, c) parámetro C, y d) parámetro D.</i>	127
<i>Figura 6.3 - Comparación entre resultados numéricos y ecuación 6.1</i>	128
<i>Figura 6.4 - Comparación entre datos numéricos, Ecuación 6.6 y Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005)</i>	130
<i>Figura 6.5 - Comparación entre datos numéricos y Ecuación 6.9</i>	131
<i>Figura 6.6 - Influencia de la resistencia a tracción. Ecuación 6.11 frente a los datos numéricos.</i>	133
<i>Figura 6.7 - Comparación de tensiones últimas. Fórmulas propuestas frente a datos experimentales de la presente investigación</i>	134
<i>Figura 6.8 - Comparación de tensiones últimas. Fórmulas propuestas frente a datos experimentales reportados por Hasan y Hendry (1976)</i>	136
<i>Figura 6.9 - Comparación de tensiones últimas. Fórmulas propuestas frente a datos experimentales reportados por Kirtschig y Anstötz (1991)</i>	137

<i>Figura 6.10 - Comparación de tensiones últimas. Fórmulas propuestas frente a datos experimentales reportados. a) Watstein y Allen (1970); b) SCPRF Report N°9 (1965)</i>	138
<i>Figura 6.11 - Comparación de valores de tensiones experimentales y empíricas para las campañas de Fattal y Cattaneo (1976) y Burns (1972).</i>	139
<i>Figura A.1 - Configuración y mallado típico</i>	154
<i>Figura A.2 - Comparación entre tensiones últimas experimentales y obtenidas mediante micro-modelización y macro-modelización</i>	156
<i>Figura A.3 - Comparación diagramas tensión-deflexión lateral: a) esbeltez 18.7; b) esbeltez 25.6</i>	156
<i>Figura A.4 - Esbeltez 6.8: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada</i>	157
<i>Figura A.5 - Esbeltez 12.6: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada</i>	158
<i>Figura A.6 - Esbeltez 18.7: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada</i>	158
<i>Figura A.7 - Esbeltez 25.6: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada</i>	159
<i>Figura A.8 - Esbeltez 12.6: Fisuración en rotura y deformada</i>	159
<i>Figura A.9 - Esbeltez 18.7: Fisuración en rotura y deformada</i>	160
<i>Figura A.10 - Esbeltez 25.6: Fisuración en rotura y deformada</i>	160
<i>Figura B.1 - Comparación de resultados experimentales y predicciones usando la Ecuación 6.9: a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)</i>	162
<i>Figura B.2 - Comparación de resultados experimentales y predicciones usando el método de Morton (1991): a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)</i>	162
<i>Figura B.3 - Comparación de resultados experimentales y predicciones usando el método de Knutsson (1991): a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)</i>	163
<i>Figura B.4 - Comparación de resultados experimentales y predicciones usando el método de Glock y Graubner (2003): a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)</i>	163
<i>Figura B.5 - Comparación de resultados experimentales y predicciones usando el método de Lu (2003): a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)</i>	164
<i>Figura B.6 - Comparación de resultados experimentales y predicciones usando el método de Eurocódigo 6 (2005): a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)</i>	164

Índice de Tablas

<i>Tabla 2.1 – Resultados experimentales obtenidos por Hasan y Hendry (1976). Tensiones en N/mm^2</i>	39
<i>Tabla 2.2 – Resultados experimentales obtenidos por Watstein y Allen (1970). Tensiones en N/mm^2</i>	42
<i>Tabla 2.3 – Resultados experimentales obtenidos por Kirtschig y Anstötz (1991). Tensiones en N/mm^2</i>	44
<i>Tabla 2.4 – Resultados experimentales (Fattal y Cattaneo, 1976)</i>	45
<i>Tabla 2.5 – Resultados experimentales (SCPRF, 1965)</i>	47
<i>Tabla 3.1 – Piezas - Resistencia a compresión</i>	56
<i>Tabla 3.2 – Piezas - Resistencia a flexo-tracción</i>	56
<i>Tabla 3.3 – Resultados prueba de absorción</i>	58
<i>Tabla 3.4 – Resultados a flexión y compresión para el micro-mortero endurecido</i>	59
<i>Tabla 3.5 – Resistencia a compresión uniaxial y módulo de Young de la fábrica</i>	60
<i>Tabla 3.6 – Relaciones experimentales para E/f_c</i>	61
<i>Tabla 3.7 – Resultados ensayos a tracción directa</i>	63
<i>Tabla 3.8 – Programa de ensayos</i>	64
<i>Tabla 3.9 – Resultados experimentales. Tensiones de rotura en N/mm^2</i>	70
<i>Tabla 4.1 – Valores experimentales empleados para estimar E_b</i>	89
<i>Tabla 4.2 – Resumen de parámetros empleados en las simulaciones numéricas</i>	90
<i>Tabla 5.1 – Valores asignados a E_b y k_n; y relación E/f_c numérica</i>	109
<i>Tabla 5.2 – Valores asignados a f_t</i>	109
<i>Tabla 5.3 – Valores de $\tan\phi$, G_f^I y G_f^{II} adoptados en el estudio paramétrico</i>	110
<i>Tabla 5.4 – Estudio paramétrico. Resumen de valores adoptados</i>	112
<i>Tabla 6.1 – Límites de aplicabilidad</i>	126
<i>Tabla 6.2 – Valores de tensiones experimentales y empíricas para las campañas de Fattal y Cattaneo (1976) y Burns (1972)</i>	139
<i>Tabla A.1 – Propiedades de la fábrica para el macro-modelo</i>	155

1

Introducción

1.1. Generalidades

La obra de fábrica es probablemente el material de construcción más antiguo que aún encuentra amplio uso en la industria de la construcción contemporánea. Las tipologías estructurales más adecuadas a sus características mecánicas y resistentes son aquellas que experimentan estados permanentes de compresión frente a diversas acciones. Pilares, arcos, bóvedas y paredes de carga son elementos estructurales que se encuentran dentro de estas tipologías.

En las últimas décadas, estudios principalmente orientados a la conservación y restauración de estructuras del patrimonio arquitectónico histórico han contribuido vastamente a lograr un mejor entendimiento del comportamiento de estas construcciones. Sin embargo, y a pesar de este esfuerzo investigador, continúa existiendo un cierto déficit en la disponibilidad de métodos y criterios de análisis precisos y fiables para la evaluación práctica de estructuras de obra de fábrica, y en particular, de muros.

Estos elementos constituyen una de las tipologías estructurales en obra de fábrica de más amplio uso. De hecho, gran parte del parque edificado de las ciudades españolas y europeas se estructura a base de muros de obra de fábrica. Un ejemplo de ello es el distrito del Eixample, en Barcelona, donde aproximadamente el 65% de sus edificios está estructurado en base a esta tipología estructural (Moreno, 2006).

Los muros soportan principalmente cargas verticales, pero también pueden estar sujetos a momentos flectores provocados por forjados, a imperfecciones en su alineación vertical, a deformaciones debidas a esfuerzos de 2º orden o a la acción de cargas horizontales, entre otras acciones. Bajo estos efectos, las paredes de carga, principalmente aquellas que presentan mayor esbeltez, pueden ser especialmente sensibles debido a la posibilidad de fallar por pandeo. Dada la importancia de este fenómeno en muros de obra de fábrica, la predicción de la seguridad estructural de construcciones existentes requiere de criterios bien calibrados que, en particular, contemplen los modos de fallo fundamentales bajo carga vertical centrada o excéntrica.

El estudio del fallo por pandeo transversal al plano en paredes de obra de fábrica recibió especial atención a mediados del siglo XX; producto de la investigación entonces realizada son gran parte de los trabajos analíticos, empíricos y experimentales disponibles en la literatura.

El problema de estudiar la estabilidad en muros de obra de fábrica a través de procedimientos analíticos es complejo debido al comportamiento no-lineal por el material –causado, entre otros aspectos, por la baja o casi nula resistencia a tracción– y no-lineal por la geometría, que surge de considerar los efectos de segundo orden. Como consecuencia de esta complejidad, la mayoría de los métodos disponibles se ha ocupado de condiciones de carga y apoyo muy específicas y ha empleado relaciones particulares entre tensión y deformación. Asimismo, gran parte de dichos métodos ignora el efecto favorable de la resistencia a tracción del material para simplificar sus operaciones. Una dificultad adicional reside en la escasez de referencias experimentales que permitan comprobar tales métodos, aunque existen algunos resultados disponibles.

La normativa vigente, tanto a nivel español (CTE-DB-SE-F, 2007) como europeo (EN 1996-1-1: 2005), está basada en la aproximación de una solución teórica compleja desarrollada a partir de ensayos de paredes de mortero, y por lo tanto no representa el comportamiento real de la fábrica. Este hecho, unido a que estas normativas están principalmente orientadas a construcciones de nueva planta y son, en general, poco aplicables al caso de construcciones existentes, plantea la necesidad de contar con herramientas simplificadas y criterios prácticos de comprobación estructural de muros de obra de fábrica. En este contexto, la combinación de evidencia experimental y simulación numérica puede ser la clave para proponer, validar y extender nuevos métodos simples.

El empleo sistemático de una aplicación numérica –debidamente calibrada a través de la experimentación– parece ser una alternativa adecuada para superar los inconvenientes que presentan diversas formulaciones existentes. Aunque recientemente varios investigadores (La Mendola, 1997; Ganduscio y Romano, 1997; Mura, 2008; entre otros) han estudiado la estabilidad de muros de obra de fábrica a través de modernas aplicaciones numéricas, existe escasa labor sistemática orientada al desarrollo de criterios de carácter práctico teniendo en cuenta el fallo por pandeo. En este sentido, los trabajos realizados por Payne et al. (1990), Glock (2003) y Lu (2003) presentan particular interés.

1.2. Motivación y alcances

La seguridad ante el fallo por pandeo de muros de obra de fábrica tiene una especial importancia entre las comprobaciones de seguridad en edificios existentes. Sin embargo, a pesar de los resultados experimentales disponibles (aunque escasos) y de las modernas aplicaciones numéricas, los técnicos apenas disponen de criterios para la evaluación práctica de los muros.

Para propósitos de diseño, parece razonable considerar que el material no resiste tensiones de tracción. No obstante, cuando el fallo por pandeo está presente, y particularmente en muros esbeltos, la carga de colapso podría ser, de hecho, muy dependiente de la resistencia a tracción del material. Por esta razón, cualquier análisis numérico o teórico realista, dirigido a producir predicciones suficientemente precisas, necesita considerar la influencia de la resistencia a tracción sobre la respuesta última.

Una mejor comprensión de la influencia de los principales parámetros presentes en el comportamiento al pandeo de muros de obra de fábrica a través de análisis numéricos puede conducir a nuevas formulaciones de evaluación estructural y resistente más realistas. Con ello se podría contribuir a la gestión del parque edificado en obra de fábrica. En particular, al estudio de su vulnerabilidad ante futuras actuaciones (mantenimiento, reparación o rehabilitación) y a la definición de sus necesidades de refuerzo.

En este contexto, proponer nuevas formulaciones de carácter práctico implica cumplir al menos tres criterios esenciales; primero, la aplicación numérica utilizada debe ser coherente con las propiedades materiales de la fábrica, tanto a nivel de materiales constituyentes como a nivel compuesto; segundo, el análisis debe ser coherente con la evidencia experimental disponible; y tercero, también es deseable que la nueva propuesta sea simple de utilizar en situaciones prácticas.

Cabe notar que la estabilidad de un muro bi-articulado sometido únicamente a carga vertical centrada o excéntrica ha sido el caso más intensamente investigado en la literatura, tanto analítica (Chapman y Slatford, 1957; Kukulski y Lugez, 1966; Haller, 1969; Yokel, 1971; Colville, 2001; entre otros) como experimentalmente (Watstein y Allen, 1971; Hasan y Hendry, 1976; Fattal y Cattaneo, 1976; entre otros). El método propuesto por la normativa vigente (CTE-DB-SE-F, 2007; EN 1996-1-1: 2005) también representa dicha condición, en la que además la carga vertical actúa con la misma excentricidad tanto en la base como en la cima del muro. Debido principalmente a estos motivos, la presente investigación igualmente se ocupa de elementos simplemente apoyados bajo carga axial con idéntica excentricidad en los extremos.

1.3. Objetivo general

El objetivo general de la presente tesis doctoral es analizar la respuesta resistente de muros de obra de fábrica bajo carga vertical centrada y excéntrica. La investigación documental, experimental y numérica obtenida permitirá formular y validar uno o varios métodos simples para predecir con precisión la carga de colapso en estos elementos considerando el fallo por inestabilidad lateral.

En particular, los métodos simples propuestos deben reflejar en su formulación la influencia de los principales parámetros que intervienen en los mecanismos de rotura observados en la práctica, así como también, deben tener en cuenta la incidencia de los efectos relacionados con la no-linealidad geométrica (teoría de 2º orden).

1.4. Objetivos específicos

Los objetivos concretos que se persiguen en la presente investigación son:

- Revisar el estado actual del conocimiento relacionado con estudios analíticos, empíricos, experimentales y numéricos sobre la estabilidad de muros de obra de fábrica. En el caso de los estudios experimentales, la investigación alcanzará tanto a las técnicas experimentales empleadas como a los resultados obtenidos.
- Caracterizar experimentalmente -a escala reducida- el comportamiento resistente de muros simples de obra de fábrica bajo carga vertical centrada y excéntrica. A estos efectos, se construirán paredes con distintas razones de esbeltez y posteriormente serán ensayadas con giro permitido en ambos extremos bajo carga centrada y excéntrica uniformemente distribuida. Se estudiarán las formas de rotura y los posibles problemas de inestabilidad lateral.

- Seleccionar y validar una aplicación numérica capaz de simular la respuesta de los muros ensayados en laboratorio. La validación se realizará mediante comparación entre la predicción numérica y los resultados experimentales. La fiabilidad del modelo numérico seleccionado también será contrastada frente a resultados experimentales previos reportados en la literatura.
- Evaluar la influencia de diversos parámetros en la respuesta frente al pandeo de muros de obra de fábrica. Para ello, se llevará a cabo un estudio paramétrico detallado con el fin de ampliar la evidencia experimental a una mayor diversidad de geometrías, propiedades materiales y condiciones de carga.
- Aportar una o varias formulaciones simples, de carácter ingenieril, que permitan evaluar la capacidad resistente de muros bajo carga vertical centrada o excéntrica. Estas formulaciones serán calibradas a partir de resultados numéricos y validadas frente a evidencia experimental disponible.
- Obtener conclusiones generales y particulares sobre la respuesta resistente de paredes simples de obra de fábrica considerando el fallo por pandeo.

1.5. Metodología y contenido

Un enfoque metodológico basado en teoría, experimentación y simulación numérica sistemática parece una estrategia integral para analizar la respuesta resistente de muros de obra de fábrica teniendo en cuenta el fallo por pandeo.

En este contexto, el desarrollo de la presente investigación será una combinación de los siguientes recursos: (1) revisión del estado del conocimiento; (2) ensayos mecánicos en laboratorio a escala reducida; (3) simulación numérica detallada; (4) desarrollo de un estudio paramétrico, y (5) propuesta de formulaciones simples. Parte de la metodología de trabajo empleada en la presente tesis se muestra en el esquema de la figura 1.1.

A continuación se resume brevemente el método empleado y su relación con el contenido del documento.

- ***Revisión del estado del conocimiento***

La revisión documental, descrita en el capítulo 2, se centra particularmente en aquellos trabajos referidos a la caracterización teórica y experimental de la estabilidad de muros y paredes estructurales de obra de fábrica bajo cargas verticales aplicadas en su plano. Con respecto a los trabajos teóricos, se presta especial atención a los trabajos analíticos y de simulación numérica más representativos o frecuentemente citados por investigaciones más recientes. La investigación documental también hace énfasis en los trabajos experimentales previos disponibles.

- ***Ensayos mecánicos en laboratorio a escala reducida 1:4***

La viabilidad de trabajar en base a modelos de elementos de obra de fábrica a escala reducida 1:4 mediante la utilización de ladrillos y micro-morteros especialmente diseñados y fabricados al efecto se ha probado satisfactoriamente en trabajos previos llevados a cabo por Lobato (2009) y Charry (2010). El proceso constructivo y los ensayos sobre paredes simples desarrollados con motivo de la presente investigación quedan descritos en el capítulo 3. Además, en esta etapa se detallan los ensayos normativos para determinar las distintas propiedades de los materiales constituyentes, así como también propiedades medias del material compuesto a través de pequeños ensamblajes. Los resultados obtenidos serán empleados posteriormente en la calibración de una aplicación numérica.

- **Simulación numérica**

La etapa de simulación numérica, detallada en el capítulo 4, se centra en la puesta a punto y calibración de un modelo numérico basado en el método de los elementos finitos (MEF) para simular el comportamiento observado experimentalmente. La fiabilidad de la aplicación numérica adoptada también será evaluada a través de la simulación de resultados experimentales previos disponibles en la literatura.

- **Estudio paramétrico detallado**

Esta etapa, desarrollada en el capítulo 5, plantea la utilización sistemática del modelo numérico calibrado y validado en el capítulo 4 en el desarrollo de un amplio estudio paramétrico. Esto permitirá extrapolar y/o extender la evidencia experimental obtenida a una mayor diversidad de situaciones en relación a geometrías, propiedades materiales y condiciones de carga.

- **Propuesta de método simple**

La posibilidad de establecer una o varias formulaciones simplificadas a partir de modelos complejos es el objetivo último de la presente tesis doctoral. Las formulaciones simples, que se presentan en el capítulo 6, deben ser suficientemente fiables (al estar basadas en leyes constitutivas apropiadas y en las principales características del comportamiento frente al pandeo), y precisas (al estar contrastadas experimentalmente). Las fórmulas han sido obtenidas a partir del conjunto de resultados generado en el estudio paramétrico llevado a cabo en el capítulo 5.

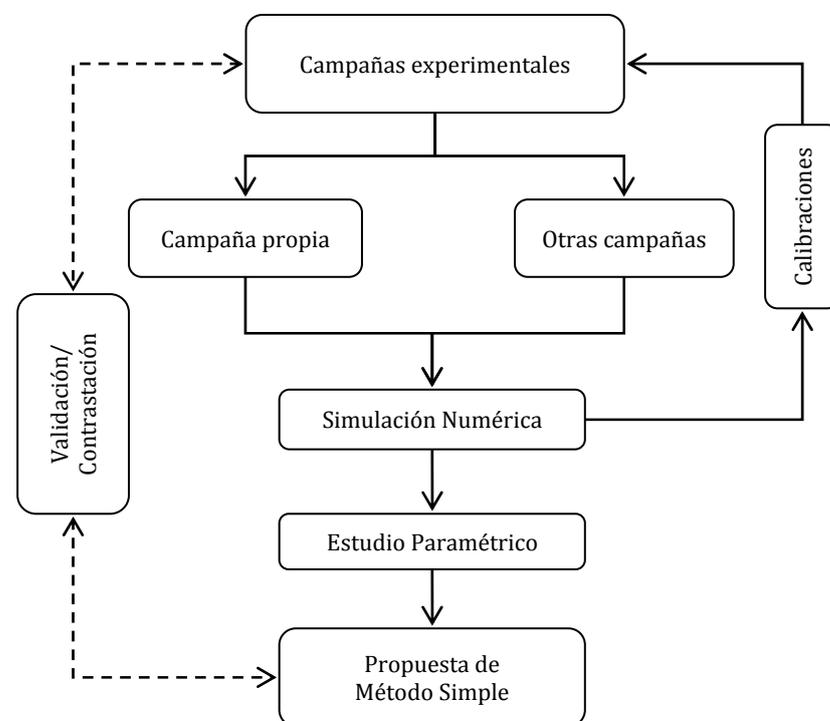


Figura 1.1 – Metodología general de trabajo

Finalmente, en el capítulo 7 se ofrecen las conclusiones tanto generales como específicas que se derivan de este estudio. Además, se presenta un panorama de las posibles líneas futuras de investigación que pueden plantearse a partir de los trabajos desarrollados en esta tesis doctoral.

2

Estado del conocimiento

2.1. Introducción

La capacidad portante de muros de obra de fábrica depende principalmente de parámetros como la razón de esbeltez (esto es h/t , la razón entre la altura efectiva y el espesor efectivo del elemento) y la excentricidad de las cargas verticales. También depende de las propiedades de sus componentes, tales como la resistencia a compresión de las unidades y del mortero, y la resistencia a tracción de su interface. La figura 2.1 (Morton, 1990) muestra una curva típica entre tensión de rotura y razón de esbeltez. En ella puede observarse que para un elemento con baja esbeltez, el fallo será por aplastamiento del material, mientras que para elementos esbeltos, el fallo ocurrirá debido a la inestabilidad lateral (fallo por pandeo). Existe también una zona de transición caracterizada por una interacción entre el fallo por aplastamiento del material y el pandeo. La presencia de excentricidad en las cargas verticales aplicadas incrementa la tendencia a pandear, y por consiguiente, la reducción de la capacidad de carga aumenta.

El estudio de las condiciones de estabilidad en paredes de carga de obra de fábrica esbeltas debe considerar diferentes causas de no-linealidad. Por una parte, destaca la importancia de la no-linealidad de naturaleza geométrica derivada de los efectos de segundo orden y de la posible reducción de la sección transversal debido a la fisuración a tracción; y por otra, la no-linealidad derivada a partir de la ley constitutiva del material.

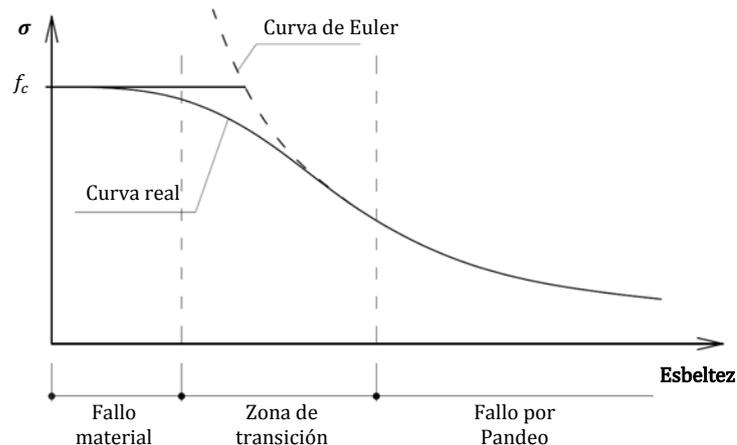


Figura 2.1 – Tensión de rotura en paredes de carga de obra de fábrica vs razón de esbeltez (basada en Morton, 1990).

Varios autores (Angervo, 1954; Chapman y Slatford, 1957; Kukulski y Lugez, 1966; Haller, 1969; Turkstra, 1970; Yokel, 1971; Colville, 2001; De Falco y Lucchesi, 2002; Glock, 2004; Mura, 2008; entre otros) han investigado este comportamiento y han propuesto diversos modelos para representar la condición de estabilidad de elementos bajo múltiples combinaciones de carga (incluyendo peso propio) y condiciones de contorno. Comúnmente, las formulaciones analíticas disponibles se basan en la resolución de la ecuación diferencial que gobierna la forma deformada del elemento. Para ello, la mayoría de estos estudios considera que el material no resiste tensiones de tracción y presenta un comportamiento lineal en compresión. Sin embargo, en estudios más recientes -que incorporan diversas condiciones de carga y comportamiento no-lineal en compresión- se emplean herramientas numéricas avanzadas para resolver el problema.

Otra estrategia de solución, aunque menos explorada, ha sido el método de los elementos finitos (MEF). En esta estrategia se pueden distinguir dos enfoques utilizados. El primero, basado en el uso de elementos de interface en lugar de las juntas de mortero (estrategia de micro-modelización), y el segundo, basado en propiedades materiales homogéneas para todo el continuo (estrategia de macro-modelización). Las diferentes estrategias de solución se resumen en la figura 2.2.

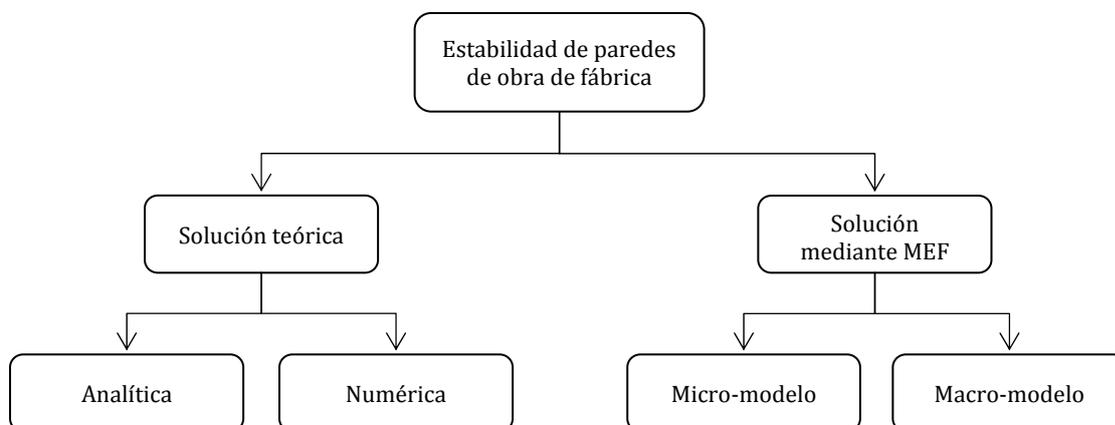


Figura 2.2 – Enfoques para resolver el problema de estabilidad en paredes de obra de fábrica

Dentro de este contexto, el presente capítulo aborda el estado actual del conocimiento en el tema, con énfasis en los estudios teóricos y aquellos basados en el MEF más relevantes realizados hasta la fecha. En especial, se revisan aquellos trabajos que estudian la estabilidad de elementos bajo carga vertical centrada o excéntrica, y en condiciones de apoyo simple en ambos extremos. Asimismo, también se revisan métodos normativos vigentes y algunas aportaciones de métodos de carácter práctico disponibles en la literatura.

Además, como parte de esta investigación documental, también se revisan aquellos trabajos experimentales más estrechamente ligados al presente estudio. Todo ello se realiza con el fin de extraer conclusiones generales y particulares del estado actual del conocimiento.

Para ello, en primer lugar, es obligado realizar una breve revisión general acerca del comportamiento mecánico de la obra de fábrica como material compuesto. Esta breve revisión se realiza únicamente para estados de tensiones de compresión y tracción, puesto que son las sollicitaciones predominantes en el comportamiento a pandeo en muros de obra de fábrica. Una revisión del comportamiento mecánico de la obra de fábrica bajo otros estados de sollicitación puede encontrarse en Hendry (1990), Anthoine (1992), Molins (1996) y Martínez et al. (2001), entre otros.

2.1.1. Objetivos

La etapa de investigación documental tiene por objetivo principal revisar el estado actual del conocimiento en relación al ámbito de estudio de esta tesis doctoral. Para cumplir con este objetivo se revisa un número significativo de trabajos que estudian la estabilidad en muros de obra de fábrica bajo distintos enfoques y configuraciones de carga y apoyo.

En este contexto, se establecen los siguientes objetivos específicos para el presente capítulo:

- Revisar trabajos teóricos sobre la estabilidad en paredes de carga de obra de fábrica bajo distintos estados de carga. En especial, bajo carga vertical centrada y/o excéntrica.
- Revisar trabajos experimentales referidos al ámbito de estudio. Esta investigación documental alcanza tanto a técnicas experimentales empleadas como a los resultados obtenidos.
- Revisar las principales aportaciones de métodos de carácter práctico para la comprobación resistente de paredes teniendo en cuenta el fallo por pandeo. Esta investigación también alcanza a los métodos propugnados en la normativa vigente.
- Revisar las principales técnicas de modelización numérica de estructuras de obra de fábrica basadas en el método de los elementos finitos para su posible uso en la presente investigación.

2.1.2. Organización del estudio

En la primera parte del presente capítulo se revisa brevemente el comportamiento de la obra de fábrica bajo estados de compresión y tracción.

A continuación, en el apartado 2.3, se revisa la condición de estabilidad de paredes de carga de obra de fábrica bajo distintos enfoques. Por un lado, estudios teóricos que intentan resolver analítica y numéricamente la ecuación que gobierna la forma deformada, y por otro, trabajos que emplean el MEF. Igualmente, en este apartado son revisados algunos métodos normativos y varias aportaciones de métodos y criterios simples disponibles en la literatura.

El apartado 2.4 contiene una revisión de los trabajos experimentales disponibles y que por sus condiciones de ensayo se encuentran estrechamente relacionados con esta investigación. En este apartado, los resultados experimentales previos son presentados en forma tabulada y también en forma gráfica para su mejor comprensión.

El apartado 2.5 describe brevemente las técnicas de macro y micro-modelización. Ambas estrategias de simulación numérica, basadas en el MEF, podrían ser empleadas en la simulación del comportamiento al pandeo de paredes de obra de fábrica.

Por último, se presenta una discusión final que resume los aspectos más relevantes del estado actual del conocimiento.

2.2. La obra de fábrica

2.2.1. Generalidades

De acuerdo a las prescripciones del Instituto Eduardo Torroja (PIET-70, 1971), la obra de fábrica es:

“todo elemento de obra obtenido por colocación de ladrillos, bloques, piedras de cantería o adobes, unos junto a otros y sobre otros, ordenadamente *y solapados de acuerdo con unas determinadas leyes de traba*”.

La ley de traba (o aparejo) rige la disposición en que deben colocarse los materiales de una obra de fábrica para garantizar su unidad constructiva (figura 2.3). Generalmente, las unidades que conforman la obra de fábrica están vinculadas entre sí por algún tipo de mortero, ya sea a base de arcilla, betún, limo, cemento o cal, entre otros.

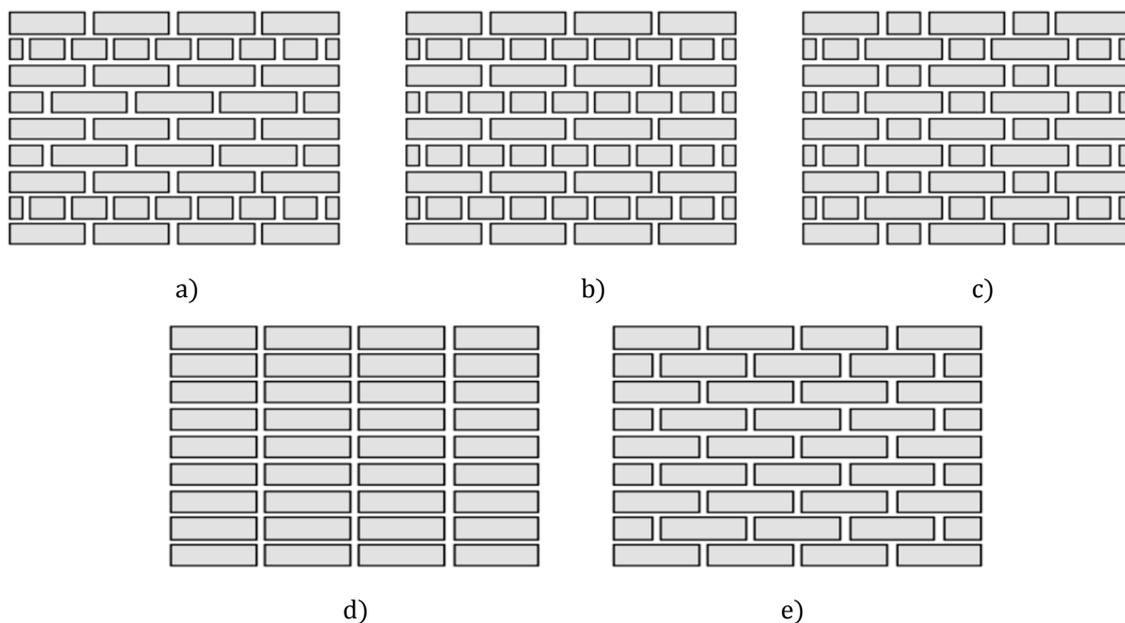


Figura 2.3 - Diferentes leyes de traba o aparejos: a) americano; b) inglés; c) flamenco; d) liso; y e) trabado

Dos rasgos principales destacan en las estructuras constituidas por este tipo de material. En primer lugar, los elementos de obra de fábrica (si se observan como un sólido continuo) son marcadamente anisótropos, es decir, presentan propiedades diferentes según la dirección de aplicación de las cargas. En segundo lugar, estos elementos poseen baja resistencia a tracción. Ambos fenómenos se deben principalmente a la presencia de las juntas horizontales y verticales que actúan como planos de debilidad,

ya que la interface unidad-mortero tiene una unión débil. Además, las juntas de mortero son las responsables de la mayor parte del comportamiento no-lineal de la obra de fábrica.

Existen muchos factores que influyen en el comportamiento de un elemento de obra de fábrica, como por ejemplo, el tamaño y la disposición de las unidades, el material que compone las unidades o el tipo de mortero y la interacción entre ellos.

En general, se asume que los factores que más afectan el comportamiento tenso-deformacional en la obra de fábrica son (Hendry, 1990):

- *De las unidades:* la resistencia, geometría y tipología (sólido, perforado, hueco, etc.) y la capacidad de absorción.
- *Del mortero:* la resistencia, las características de deformación relativa y el espesor relativo.
- *De la interfaz unidad-mortero:* la adherencia y la dirección de los esfuerzos aplicados.

Algunos de estos factores, tales como las características de las unidades, se determinan en el proceso de fabricación o manufactura, mientras otros, tales como las propiedades del mortero, son susceptibles a las variaciones de los materiales constituyentes.

2.2.2. Comportamiento bajo compresión uniaxial

2.2.2.1. Criterio de rotura

Un objetivo primordial de muchos investigadores (Naraine y Sinha, 1989; McNary y Abrams, 1985; Binda et al., 1988; Anthoine, 1992; Kaushik et al., 2007; entre otros) ha sido la evaluación de la resistencia a compresión uniaxial de la fábrica a partir de las características mecánicas de sus materiales constituyentes. En la mayoría de estos estudios se ha aceptado que la diferencia entre las características deformacionales de unidades y mortero es la causa generadora del fallo (en general, las unidades presentan mayor rigidez que el mortero).

Experimentalmente se ha observado que, como consecuencia de aplicar una carga de compresión normal a las juntas horizontales de la obra de fábrica, se genera un estado de compresión triaxial en el mortero y de compresión vertical y tracciones en el plano horizontal para las unidades (figura 2.4).

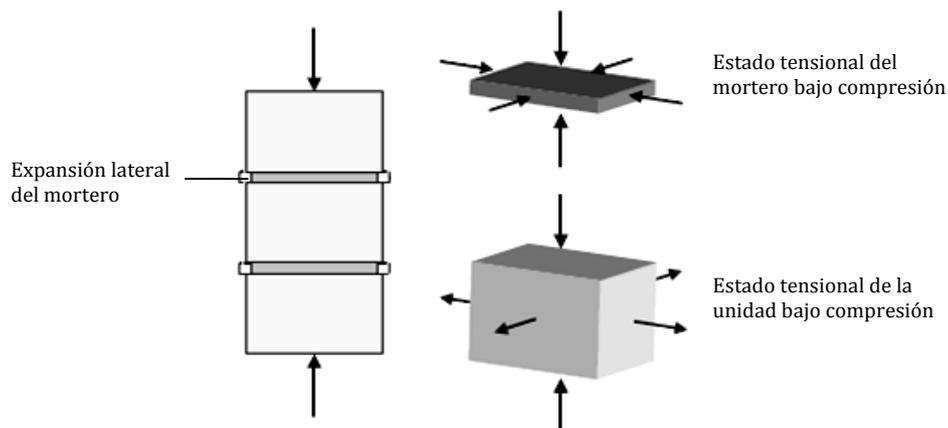


Figura 2.4 - Estado de tensiones en la unidad y en el mortero bajo compresión uniaxial

Lo anterior se puede explicar de la siguiente manera: si se aplica una carga de compresión perpendicular a las juntas horizontales, el mortero allí presente tenderá a expandirse lateralmente en mayor grado que las unidades que lo rodean, debido a la diferencia de rigideces entre ambos materiales. Sin embargo, cuando esta expansión trata de tener lugar, las unidades la impiden a causa de la adherencia existente entre la unidad y el mortero. Esto hace que el mortero genere tensiones de tracción en las unidades, al intentar desarrollar deformaciones mayores en el plano horizontal. Por esta razón, la falla bajo este estado de carga tiende a manifestarse en la rotura de las unidades en dirección perpendicular a las juntas horizontales, por el estado de tracción que allí se crea (Molins, 1996).

2.2.2.2. Resistencia a compresión

Experimentalmente, la resistencia a compresión de la obra de fábrica puede obtenerse de acuerdo con la norma EN 1052-1 (1999), que especifica un espécimen de ensayo similar al que define el conocido ensayo RILEM (Wesche y Ilantzis, 1980).

Los ensayos experimentales constituyen la forma ideal de caracterizar la resistencia a compresión del material; sin embargo, son relativamente costosos y no demasiado prácticos para propósitos de diseño. Como consecuencia de ello, varios investigadores han propuesto relaciones simples para la predicción de la resistencia de la obra de fábrica a partir de las propiedades de sus componentes. En general, estas fórmulas permiten estimar la resistencia a compresión de la fábrica a partir de las características mecánicas de piezas y mortero.

Una de estas relaciones empíricas se recoge en el Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005), donde se propone la siguiente expresión para calcular la resistencia a compresión característica f_k de la obra de fábrica:

$$f_k = K \cdot f_b^{0.7} \cdot f_m^{0.3} \quad [2.1]$$

donde f_b es la resistencia a compresión de las unidades obtenida de acuerdo con la norma EN 772-1 (2002), f_m es la resistencia a compresión del mortero obtenida de acuerdo con la norma EN 1015-11 (1999) y K es un factor que puede adoptar, por ejemplo, un valor entre 0.35 y 0.55 para piezas de arcilla.

En la ecuación 2.1 se observa que en la mayoría de los casos la resistencia de la fábrica será menor que la de sus componentes por separado y que la resistencia de las unidades es más determinante que la resistencia del mortero. De acuerdo con observaciones experimentales, una estructura de obra de fábrica sometida a un estado de compresión uniaxial alcanza el colapso en estados tensionales menores a la resistencia a compresión de las unidades, debido al efecto debilitador de las juntas. Asimismo, como también ha sido observado experimentalmente, la resistencia de la obra de fábrica incrementa cuando aumenta la resistencia a compresión de la unidad y disminuye el espesor de la junta, aunque este último aspecto generalmente no queda reflejado en las fórmulas.

Una ecuación similar, propuesta por Kaushik et al. (2007), ha sido obtenida a través de regresión lineal a partir del ensayo de 84 prismas (ecuación 2.2). La fórmula presenta una correlación de 0.93 y ha sido calibrada para trabajar con unidades de ladrillo.

$$f_k = 0.63 \cdot f_b^{0.49} \cdot f_m^{0.32} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad [2.2]$$

Trabajos recientes (Lourenço y Pina-Henriques; 2006; Kaushik et al., 2007) han realizado estudios comparativos empleando relaciones empíricas propuestas por diversos autores para estimar la resistencia a compresión. En estos trabajos se observa una amplia variación en los resultados obtenidos.

En particular, la comparación realizada por Lourenço y Pina-Henriques (2006) incluye además un modelo en tensión plana de elementos finitos; sin embargo su predicción no es satisfactoria debido a que no es capaz de reproducir satisfactoriamente los mecanismos de rotura observados experimentalmente. Por esta razón, el estudio señala que las técnicas experimentales y las fórmulas empíricas son las únicas soluciones posibles en el estado actual del conocimiento para estimar la resistencia a compresión de la fábrica. Otras fórmulas empíricas para determinar la resistencia a compresión uniaxial de la fábrica pueden ser revisadas en Tassios (1988), Hendry (1990) y Martínez et al. (2001).

2.2.2.3. Relación tensión-deformación bajo compresión

Para propósitos de diseño y comprobaciones estructurales, la resistencia a compresión es, en combinación con el módulo de elasticidad y la forma de la curva tensión-deformación, la información más relevante de la obra de fábrica. Todas estas características pueden ser determinadas a partir de ensayos a compresión uniaxial. Sin embargo, el tamaño de la probeta y las condiciones de contorno pueden ejercer una clara influencia sobre la capacidad resistente y los mecanismos de rotura observados experimentalmente (Velmelfoort, 2005).

Debido a la gran variedad de combinaciones de ladrillo y mortero, y al número comparativamente bajo de resultados experimentales actualmente disponibles para obra de fábrica, aún no existe una relación tensión-deformación universalmente aceptada por la comunidad científica.

Numerosos estudios han caracterizado este comportamiento (Turnsek y Cacovic, 1971; Naraine y Sinha, 1989; Hendry, 1990; Sarangapani et al., 2002; entre otros). Para la obra de fábrica de ladrillo, un diagrama parabólico en compresión perpendicular a los tendeles (juntas principales) puede resultar adecuado, dado que este material exhibe un marcado comportamiento no-lineal en su proceso de carga y una ligera rama de descarga post-pico. Este comportamiento puede ser observado en la figura 2.5a.

A nivel normativo, el Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) acepta que el comportamiento uniaxial $\sigma - \varepsilon$ en compresión de la fábrica siga una curva elasto-plástica del tipo parábola-rectángulo (figura 2.5b), haciendo la observación que esta relación no puede ser aplicada a todo tipo de unidades, como por ejemplo, a piezas con grandes huecos.

En las curvas de la figura 2.5, los parámetros fundamentales son la resistencia máxima a compresión (f_c), la deformación correspondiente a la resistencia máxima (ε_m) y la deformación última (ε_u).

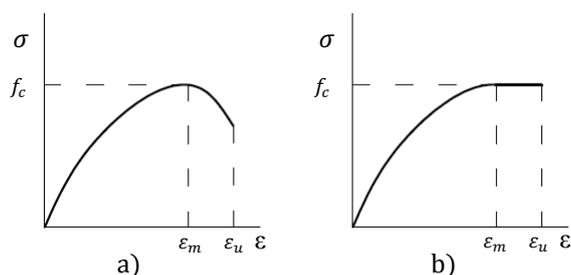


Figura 2.5 – Relaciones tensión-deformación usualmente empleadas en obra de fábrica

A falta de un valor determinado mediante experimentos, el Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) permite aproximar el módulo de deformación secante instantáneo de la fábrica E y el módulo de deformación transversal G a las siguientes expresiones:

$$E = 1000f_c \quad [2.3]$$

$$G = 0.4E \quad [2.4]$$

Sin embargo, esta forma de estimación de los valores de E y G ignora la variedad de tipos de fábrica y mortero, y parece producir valores excesivos para construcciones históricas (Martínez et al., 2001). De hecho, los valores obtenidos en campañas experimentales más recientes son considerablemente más bajos que los indicados por la normativa. Una relación realista podría incluso llegar a ser del orden de $E = 100f_c$ (Hernández, 1998).

Para propósitos prácticos de diseño y comprobación han surgido varias fórmulas empíricas que relacionan el módulo elástico y la resistencia a compresión de la fábrica. La mayoría de ellas sugiere valores de E entre 400 y 800 veces la resistencia a compresión. Recientemente, Kaushik et al. (2007) obtuvo la siguiente aproximación para obra de fábrica de ladrillo macizo de arcilla:

$$E = 550f_c \quad [2.5]$$

Esta relación es el valor promedio obtenido luego de ensayar 84 prismas con tres diferentes tipos de resistencia de mortero y cuatro tipos de unidades. En Hendry (1990) se pueden revisar otras fórmulas empíricas o fenomenológicas que relacionan el módulo elástico y la resistencia a compresión de la fábrica.

Cabe notar que, si se cambia la orientación entre la dirección de las fuerzas de compresión y la dirección de las juntas horizontales, el comportamiento observado, tanto a niveles bajos de tensión como en rotura, es muy diferente. Este fenómeno, que pone de manifiesto el carácter anisótropo del material, ha sido registrado por Samarasinghe y Hendry (1980), Page (1981, 1983) y Samarasinghe et al. (1982), entre otros. La figura 2.6 muestra el comportamiento observado bajo distintas orientaciones.

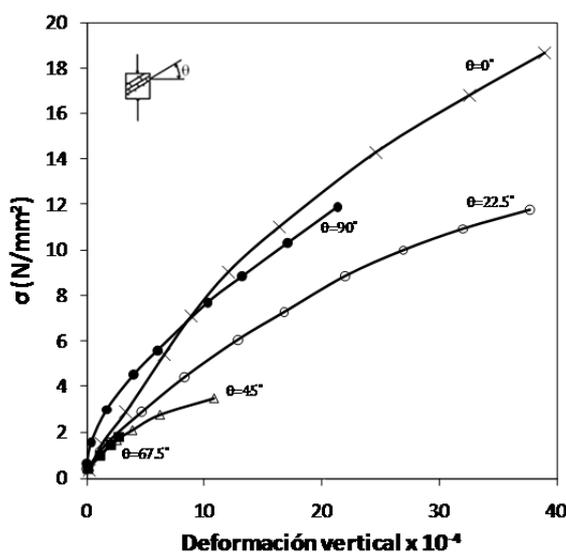


Figura 2.6 - Influencia de la orientación de los tendeles en el comportamiento tenso-deformacional de la fábrica (adaptada de Samarasinghe et al., 1982).

El cambio en la orientación entre juntas principales y dirección de aplicación de la carga también influye en los modos de rotura observados experimentalmente. La figura 2.7 muestra los modos de rotura típicos observados en paneles de ladrillo macizo bajo compresión uniaxial para distintas orientaciones. Para compresión perpendicular a las juntas principales se observa el fenómeno comentado anteriormente: las unidades fallan a tracción, creándose unas fisuras que atraviesan varias hiladas y coinciden con la ubicación de las juntas verticales. En el otro extremo, si la dirección de la carga es paralela a la de las juntas principales, la tracción se concentra en estas juntas, separándose las hiladas a causa de fisuras rectas.

En los estados intermedios se observa una combinación de ambas formas de rotura, con separación de juntas o rotura a tracción de unidades, pero siempre con un patrón de fisuras que tiende a estar en la misma dirección que las cargas de compresión.

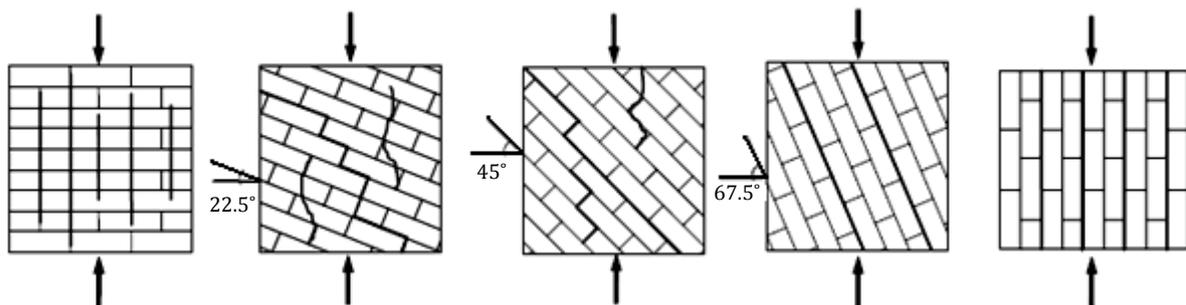


Figura 2.7 - Modos de fallo de la obra de fábrica de ladrillos macizos cerámicos bajo compresión uniaxial (Page, 1983).

2.2.3. Comportamiento a tracción uniaxial

2.2.3.1. Criterio de rotura

Es bien conocido que la obra de fábrica exhibe una resistencia a tracción muy baja o casi nula, que está gobernada por el menor valor entre la resistencia a tracción de las unidades y la resistencia a tracción de la interface unidad-mortero. En la mayoría de los casos, y sobre todo en edificaciones históricas, el colapso está condicionado por la segunda, pues la primera tiene importancia sólo cuando se emplean morteros especialmente resistentes o unidades que presentan muchas perforaciones y son, por lo mismo, propensas a fallar a bajos niveles de tracción.

En la figura 2.8 se observan diferentes patrones de fisuras obtenidos por Page (1983) en ensayos experimentales de paneles de ladrillos sometidos a tracción uniaxial. En todos los casos, la rotura se concentra en las juntas y tiende a formarse, como es lógico, perpendicular a la dirección de la tracción aplicada.

Por su parte, Backes (1985) también realizó una campaña experimental para estudiar la tracción uniaxial paralela a las juntas horizontales. Estos ensayos los realizó sobre probetas de cuatro hiladas, obteniendo curvas carga-desplazamiento mediante control por desplazamiento (figura 2.9). Observó dos tipos de fallo dependiendo de la resistencia relativa entre unidades y mortero: (a) uno diagonal escalonado (figura 2.9a) a través de las juntas horizontales y verticales, y (b) otro con fisuras prácticamente verticales a través de unidades y juntas verticales (figura 2.9b).

Los mecanismos de adhesión entre unidad y mortero pueden determinar la resistencia a tracción del material. Sin embargo, estos mecanismo aún no han sido completamente entendidos. Se sabe que se trata de procesos físico-químicos en que la estructura de poros de ambos materiales es crítica. También es

sabido que la clasificación de la arena en el mortero es importante y que arenas demasiado finas son desfavorables para la adhesión. En el caso de ladrillos de arcilla, el contenido de humedad de la pieza en el momento de la puesta en obra es también importante: piezas muy secas o muy saturadas llevan a adherencias muy bajas, como se puede concluir a partir de la figura 2.10.

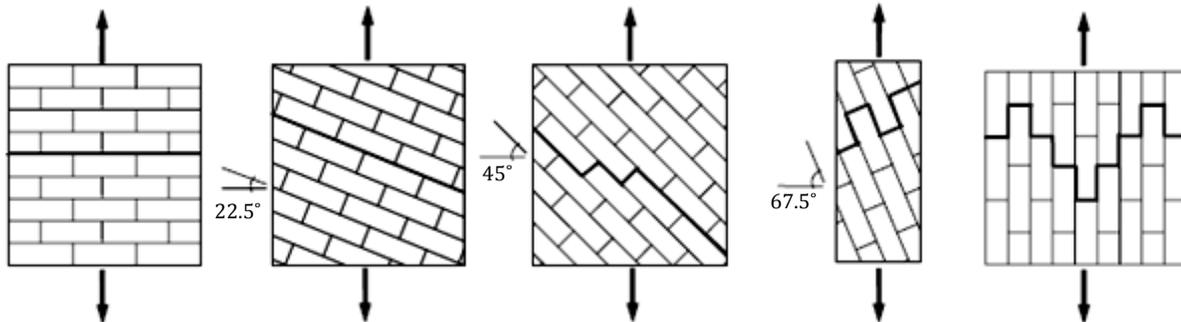


Figura 2.8 - Modos de fallo de la obra de fábrica de ladrillos macizos cerámicos bajo tracción uniaxial (Page, 1983).

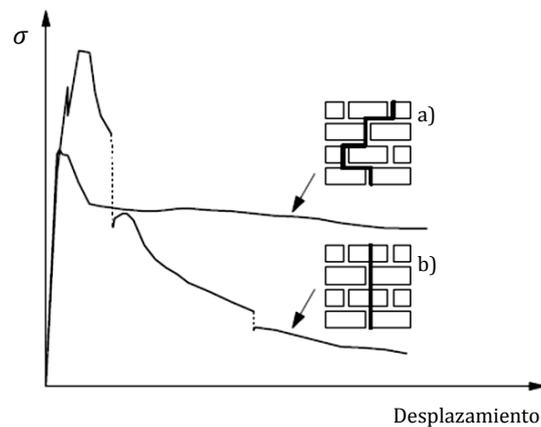


Figura 2.9 - Curvas tensión-desplazamiento para tensiones de tracción uniaxial (σ) en la dirección paralela a las juntas horizontales (Backes, 1985).

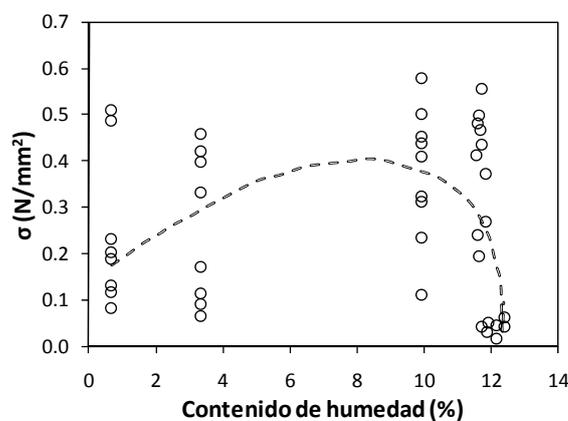


Figura 2.10 - Variación de la adhesión unidad-mortero con el contenido de humedad de las unidades al momento de la puesta en obra (Sinha, 1967; citado por Hendry, 1990).

2.2.3.2. Resistencia a tracción

Una propiedad que adquiere especial relevancia en los mecanismos de rotura fuera del plano de muros de obra de fábrica es la resistencia a tracción de la interface unidad-mortero. En estos elementos estructurales, las tensiones de tracción suelen aparecer a causa de cargas de viento o sismo, así como también por cargas verticales excéntricas, por inestabilidad geométrica producto de la esbeltez del elemento, por movimientos térmicos o movimientos a causa de giros o descensos en cimientos.

En ensayos bajo tracción directa, la resistencia a tracción se puede calcular como:

$$f_t = \frac{F_u}{A} \quad [2.6]$$

donde f_t es la resistencia a tracción, F_u es la fuerza última y A es el área de la sección transversal del espécimen donde ha ocurrido la rotura.

Ensayos llevados a cabo por Van der Pluijm (1999) revelaron que el área de contacto resultó ser más pequeña que el área de la sección transversal del espécimen (figura 2.11). De acuerdo con la evidencia, el autor determinó que la superficie de contacto promedio en probetas simples era equivalente al 35% de la superficie total de la sección. Así, realizando una extrapolación de los resultados obtenidos en probetas, Van der Pluijm (1999) estimó que la superficie neta de contacto en muros sería igual al 59% del área total de la sección transversal.

Los valores de resistencia a tracción usualmente reportados en la literatura indican que la fábrica podría resistir tensiones de tracción del orden de 2% a 3% de su resistencia a compresión (Yokel, 1971). Van der Pluijm (1999) y CUR (1997) han reportado valores contenidos entre 0.1 y 0.9 N/mm² para fábrica de ladrillo macizo de arcilla. La gran variabilidad observada en los experimentos podría deberse al gran número de factores que intervienen en el comportamiento: en unidades (composición, resistencia, presencia de huecos, tamaño, absorción, entre otros), en morteros (composición, resistencia, contenido de agua, etc.) y mano de obra (alineación vertical, correcto llenado de las juntas).

De acuerdo con Yokel (1971), la consideración de la resistencia a tracción en estudios de estabilidad de muros de obra de fábrica podría resultar en un aumento significativo de la capacidad de carga, particularmente en elementos esbeltos y sometidos a grandes excentricidades.

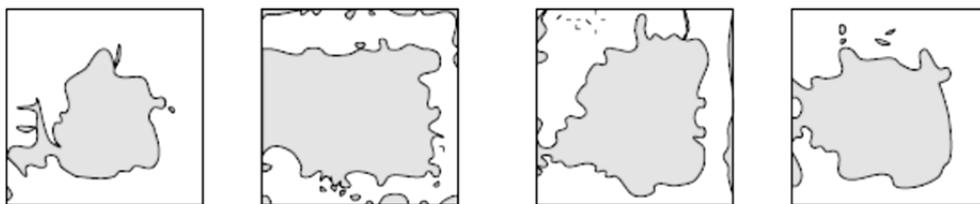


Figura 2.11 - Superficie neta de contacto para probetas de unidades macizas de arcilla bajo tracción directa encontradas por Van der Pluijm (1999).

2.2.3.3. Energía de fractura en modo I

La adherencia entre unidad y mortero es, con frecuencia, el eslabón más débil dentro de la obra de fábrica. La respuesta no-lineal de las juntas, que está gobernada por la interface unidad-mortero, es una de las características más relevantes del comportamiento mecánico de la obra de fábrica.

Se han concebido diferentes ensayos para caracterizar el comportamiento a tracción; en algunos, la resistencia a tracción se estima directamente (ensayos de tracción directa), mientras en otros, la resistencia a tracción se calcula de manera indirecta (ensayos a flexo-tracción tipo "bond wrench").

Van der Pluijm (1997) realizó una serie de ensayos de tracción directa aplicando carga monotónica bajo control por desplazamiento en probetas conformadas por unidades macizas de arcilla y silicato-cálcico (figura 2.12a). Como resultado de estos ensayos, el autor obtuvo una curva asociada al comportamiento a tracción con una forma próxima a una exponencial descendente, como la mostrada en la figura 2.12b. El área bajo esta curva es igual a la energía de fractura en modo I (G_f^I), que se define como la cantidad de energía necesaria para crear un área unitaria de una fisura a lo largo de la interface unidad-mortero.

Los valores de energía de fractura reportados por Van der Pluijm (1997), y graficados en la figura 2.13, van desde 0.001 a 0.02 Nmm/mm², para resistencias a tracción de la interface que van desde 0.04 a 0.8 N/mm². Como puede observarse en la figura 2.13, no existe una correlación clara entre ambos parámetros pero la tendencia indica que con el incremento de la resistencia a tracción, la energía de fractura también aumenta.

Para propósitos de simulación numérica, la energía de fractura en modo I se define como una propiedad inelástica del material, necesaria para describir el descenso gradual de la resistencia mecánica bajo un incremento continuo de deformación bajo tensiones de tracción.

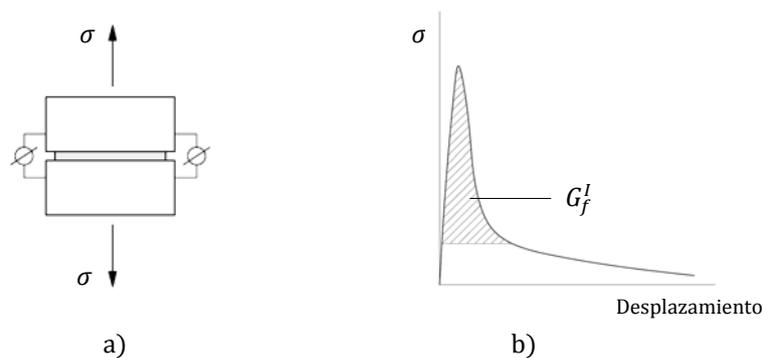


Figura 2.12 - Comportamiento de la adherencia a tracción: a) ensayo a tracción directa; b) típica curva tensión-desplazamiento para fábrica de ladrillo macizo de arcilla.

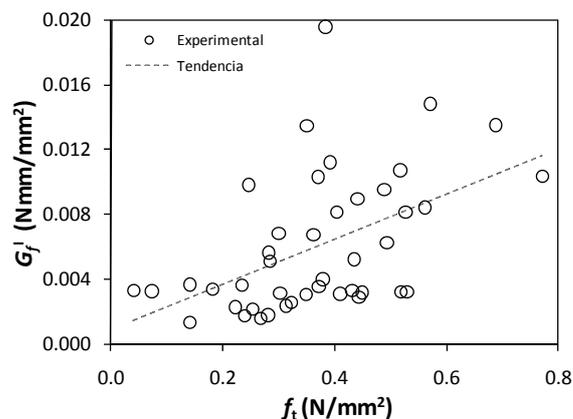


Figura 2.13 - Relación entre resistencia a tracción y energía de fractura en modo I para probetas construidas con unidades macizas de arcilla (basada en Van der Pluijm, 1997).

2.3. Estabilidad de muros de obra de fábrica

El estudio de la estabilidad en muros de obra de fábrica ha sido tema de investigación desde mediados del siglo XX. A partir de los primeros estudios (Angervo, 1954; Chapman y Slatford, 1957; Yokel, 1971), quedó en evidencia la importancia de la no-linealidad geométrica derivada de los efectos de segundo orden y la no-linealidad material producto de la baja o nula resistencia a tracción del material. Precisamente, estos dos aspectos otorgan gran complejidad al estudio puramente analítico del problema.

Como fue mencionado con anterioridad, la mayoría de las formulaciones analíticas se basa en la resolución de la ecuación diferencial que gobierna la forma deformada del elemento. Sin embargo, otro enfoque empleado se basa en la condición de equilibrio a nivel seccional. De todas formas, para incluir la no-linealidad material y diversas condiciones de contorno, generalmente son necesarios avanzados métodos numéricos.

De acuerdo con Ganduscio y Romano (1997), aunque las paredes de obra de fábrica son elementos bidimensionales, el análisis puede ser llevado a cabo ventajosamente mediante una idealización del elemento como una columna si se omiten los efectos de la restricción lateral de sus bordes verticales (es decir, si la pared se considera suficientemente ancha). Para Martini (1997), omitir la condición bidimensional es conservador, y puede llevar a subestimar significativamente la capacidad resistente de una pared.

2.3.1. Condiciones de carga y apoyo

Las soluciones teóricas hasta ahora han tratado con elementos prismáticos de sección transversal rectangular y han sido obtenidas para combinaciones particulares de carga y condición de apoyo. La figura 2.14 resume todas las configuraciones consideradas en los estudios de estabilidad de muros de obra de fábrica disponibles en la literatura.

La estabilidad de un elemento bi-articulado sometido únicamente a carga vertical excéntrica (figura 2.14a) ha sido el caso más intensamente investigado (Angervo, 1954; Chapman y Slatford, 1957; Kukulski y Lugez, 1966; Haller, 1969; Turkstra, 1970; Yokel, 1971; Colville, 2001; De Falco y Lucchesi, 2002; Glock, 2004). El caso de un elemento bajo carga vertical excéntrica y lateral distribuida actuando simultáneamente (figura 2.14b) ha recibido especial atención en la última década a través de las aportaciones debidas a Schultz et al. (2000), Lu (2003), Willis (2004), Lu et al. (2004) y Bean et al. (2008).

Por su parte, el caso de un elemento en cantiléver bajo carga axial excéntrica en combinación con carga lateral concentrada y lateral distribuida (figura 2.14c) ha sido investigado por Ganduscio y Romano (1997), mientras que Romano et al. (1993) ha propuesto una solución analítica para el caso de un elemento en cantiléver sometido a carga vertical y lateral concentrada actuando el extremo libre (figura 2.14d). El caso de un elemento en cantiléver bajo su peso propio y carga vertical excéntrica actuando en el extremo libre (figura 2.14e) ha sido investigado por La Mendola (1997) y más recientemente por Mura (2008), y bajo únicamente su peso propio (figura 2.14f) por Frish-Fay (1980).

El caso de mayor interés en la presente investigación corresponde al esquema de la figura 2.14a, dado que se trata del caso tal vez más representativo con posibilidad de ser encontrado en la práctica. Además, este caso podría llegar a representar satisfactoriamente los restantes esquemas mostrados en la figura 2.14. Para ello se podrían emplear las recomendaciones de Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) en relación a la altura efectiva de un muro, y las cargas laterales se podrían convertir convenientemente, a través de relaciones de equivalencia, a una excentricidad adicional actuando sobre las cargas verticales, como ha sido propuesto por Lu (2003).

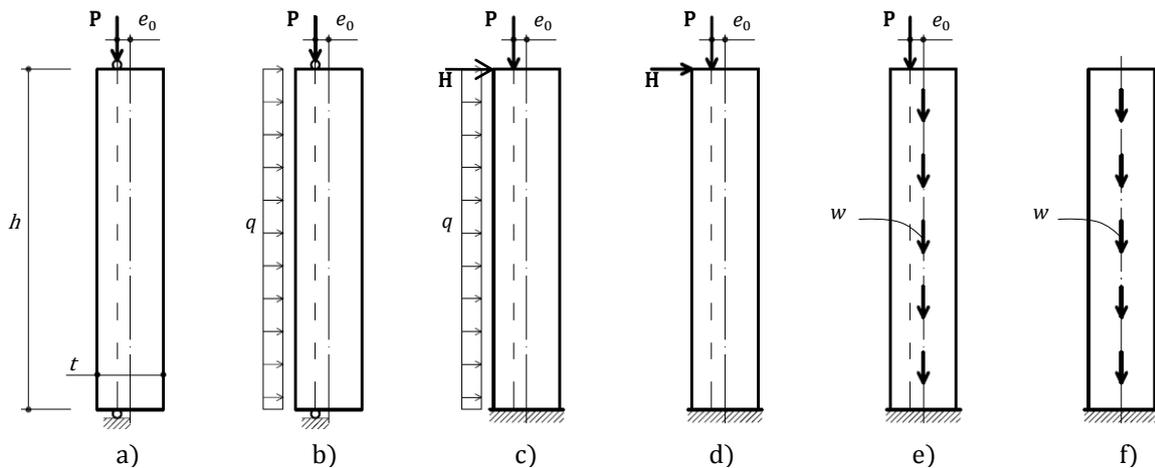


Figura 2.14 – Configuraciones de carga y condición de apoyo consideradas en diversos estudios de estabilidad de paredes de obra de fábrica disponibles en la literatura. En las figuras h es la altura y t el espesor de la pared.

2.3.2. Soluciones teóricas

La forma deformada que asume el elemento para la condición bi-articulada se idealiza para efectos de análisis de acuerdo con la figura 2.15. La gran mayoría de las formulaciones analíticas se basa en resolver la ecuación:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P(e_0 + y)}{EI} \quad [2.7]$$

En la anterior expresión, P es una fuerza de compresión uniformemente distribuida en todo el ancho del elemento, E es el módulo de Young de la fábrica e I corresponde al momento de inercia en torno al eje débil del elemento. Las imperfecciones de ejecución, consideradas usualmente a través de una excentricidad accidental, pueden ser incluidas directamente en la excentricidad e_0 con que actúa la fuerza P . Cabe notar que dichas imperfecciones pueden reducir dramáticamente la capacidad de carga de un muro.

Para un muro esbelto bajo las condiciones de la figura 2.15a, el incremento de la carga de compresión P supone un aumento de la deflexión lateral, dando lugar a una región bajo tensiones de compresión y a otra, bajo tensiones de tracción (figura 2.15b). Debido a la baja o nula resistencia a tracción, la flexotracción que se genera puede comenzar a fisurar la región bajo tensiones de tracción si se supera su resistencia (si es considerada), dando lugar a una reducción de su sección transversal efectiva (y con ello, una reducción de su momento de inercia). Este efecto hace que el elemento se vuelva más flexible, y por consiguiente, aumente la deflexión lateral debido a la flexión fuera del plano y a los efectos de segundo orden (no-linealidad geométrica). En el instante del colapso del elemento, la sección transversal efectiva en el punto de máxima deflexión lateral se reduce a cero, formándose una articulación en este punto y cada porción del elemento vuelve a ser recta. Para una excentricidad pequeña, el procedimiento descrito anteriormente también puede incluir aplastamiento de la zona bajo tensiones de compresión, al tiempo de máxima deflexión lateral.

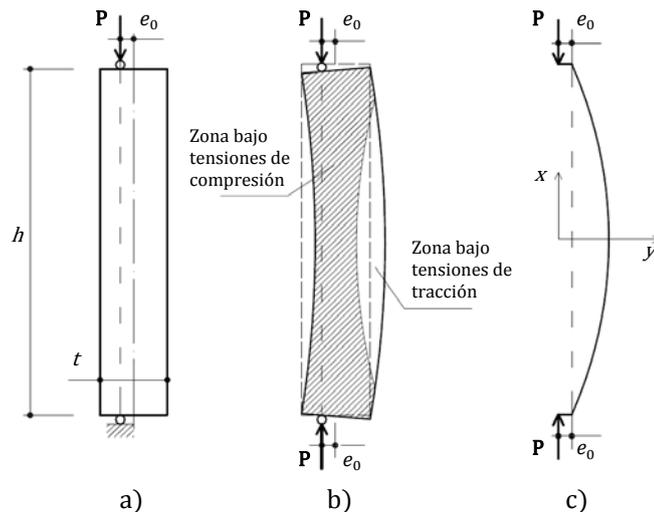


Figura 2.15 – Esquema general del problema

El análisis teórico del problema descrito anteriormente depende, fundamentalmente, de la ley tensión-deformación en compresión empleada y de su aplicación a nivel seccional. En varios de los trabajos previos (Chapman y Slatford, 1957; Yokel, 1971; Schultz et al., 2000), los autores han asumido un comportamiento elástico-lineal en compresión. En estos trabajos, la utilización de leyes elástico-lineales tuvo el propósito de lograr simplicidad en los cálculos o bien de hacer prevalecer los efectos de segundo orden por sobre la no-linealidad material. De acuerdo con Yokel (1971), la utilización de una ley de tipo lineal estaría totalmente justificada en análisis de elementos esbeltos, dado que el fallo en estos casos puede ocurrir antes de que el material exhiba un comportamiento no-lineal. Sin embargo, esta hipótesis puede no ser cierta para elementos poco esbeltos, ya que el fallo en estos casos ocurre principalmente por aplastamiento del material (Cavaleri et al., 2005). Por otro lado, La Mendola (1997) demostró que la hipótesis del comportamiento lineal conduce a resultados diferentes de los obtenidos asumiendo comportamiento no-lineal.

Romano et al. (1993) y Ganduscio y Romano (1997) investigaron la condición de estabilidad de un elemento en cantiléver empleando una ley tensión-deformación elástica no-lineal sin resistencia a tracción. En tanto, en Angervo (1954), la solución considera dos casos. En el primero, el material obedece la ley de Hooke (comportamiento lineal) y, en el segundo, el material es elástico no-lineal y toma como expresión la siguiente función tensión-deformación:

$$\frac{\sigma}{\sigma_s} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t} + 1}} \quad [2.8]$$

En esta última ecuación, ε_t y σ_s están relacionados con ε_u y f_c (deformación última y resistencia a compresión del material, respectivamente) a través de las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_u}{k_1} \quad [2.9]$$

$$\sigma_s = \frac{f_c}{k_2} \quad [2.10]$$

donde los factores k_1 y k_2 , que son parámetros de ajuste, están relacionados a través de la siguiente expresión:

$$k_2 = 1 - \frac{1}{\sqrt{2k_1 + 1}} \quad [2.11]$$

La figura 2.16a proporciona una representación gráfica de las funciones tensión-deformación empleadas por Angervo (1954), para distintos valores de k_1 y k_2 . Los resultados obtenidos pueden ser representados gráficamente como se muestra en la figura 2.16b. En esta figura $k_1 = 1.5$, $k_2 = 0.5$ y ε_f corresponde a la deformación pico en compresión.

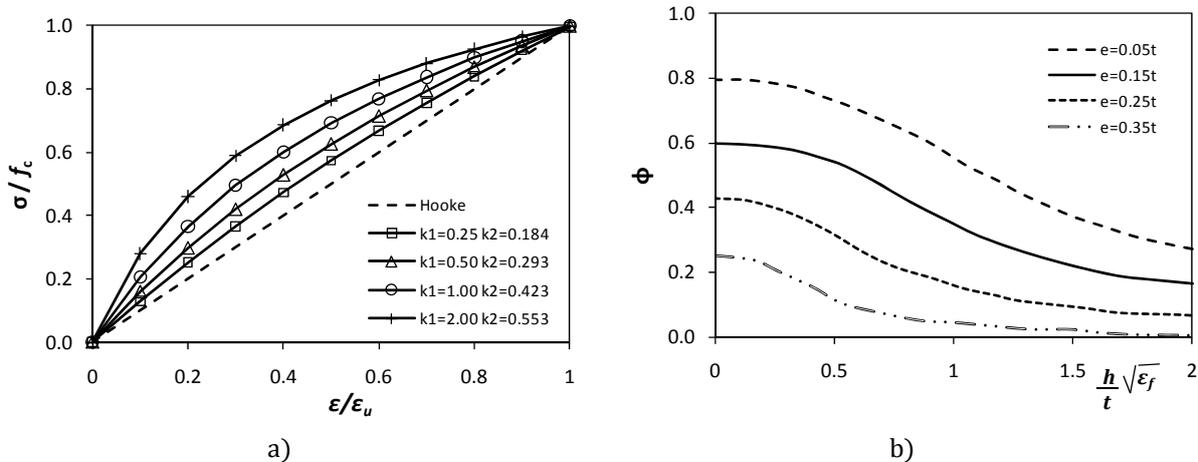


Figura 2.16 – Teoría de Angervo (1954): a) ley tensión-deformación empleada; b) resultados obtenidos representados gráficamente.

La teoría propuesta por Kukulski y Lugez (1966) está basada en los trabajos previos de Angervo (1954) y Lewicki (1962; citado por Cassinello, 1964; Kukulski y Lugez, 1966) y fue originalmente desarrollada para muros de mortero (ver Hendry, 1990; 1998).

Esta teoría utiliza una ecuación general con la forma:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{t} \quad [2.12]$$

donde ε_1 y ε_2 son las deformaciones unitarias en las fibras extremas de la sección transversal del elemento. Si la función tensión-deformación del material es conocida, es posible representar la variación $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ como una función de la excentricidad de la carga y de la tensión media de la sección considerada. Para ello, Kukulski y Lugez (1966) emplean la función $\sigma - \varepsilon$ dada por la siguiente expresión:

$$\frac{\sigma}{f_c} = \eta \cdot k \cdot \left(1 - \exp \left(-\frac{E \cdot \varepsilon}{f_c \cdot k \cdot \eta} \right) \right) \quad [2.13]$$

donde k es un parámetro que caracteriza al material

E es el módulo tangente del material

$\eta = 1$ para el comportamiento a compresión

$\eta = f_t/f_c$ para el comportamiento a tracción

Al igual que en el caso de Angervo (1954), las formulaciones propuestas por Kukulski y Lugez (1966) resultan en complejas soluciones que hacen difícil su interpretación. Para ello, en ambos trabajos se recurre a la representación gráfica de las soluciones.

La figura 2.17a muestra la ley constitutiva representada gráficamente para tres valores de k . Mientras que la figura 2.17b proporciona los resultados obtenidos para $k = 1.01$.

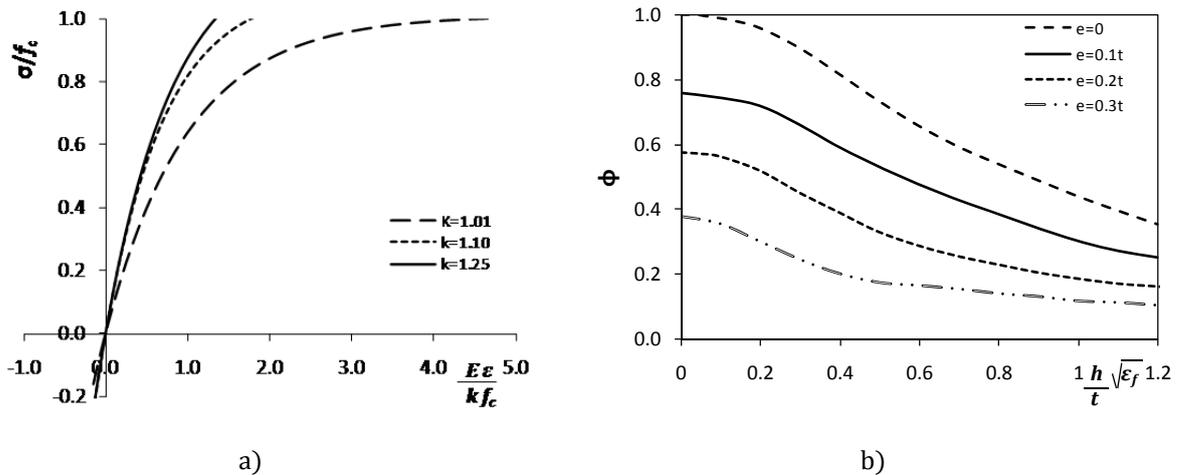


Figura 2.17 - Teoría de Kukulski y Lugez (1966): a) ley tensión-deformación empleada; b) resultados obtenidos representados gráficamente.

En un trabajo más reciente, Mura (2008) ha estudiado el caso de un elemento en cantiléver bajo carga vertical excéntrica y peso propio, considerando una ley del tipo:

$$\frac{\sigma}{\epsilon_u} = \frac{2 \cdot \epsilon}{\epsilon_u} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_u}\right)^2 \quad [2.14]$$

Esta ley constitutiva tiene una forma similar a la mostrada en la figura 2.5a, pero a diferencia, ésta no presenta una rama de ablandamiento o softening post-pico (es decir, $\epsilon_u = \epsilon_m$). Esta ley, además, no tiene en cuenta el comportamiento a tracción.

Por su parte, para estudiar un elemento biarticulado sometido a carga vertical y lateral simultáneamente, La Mendola (1997) y Lu (2003) utilizan la siguiente relación tensión-deformación obtenida por Naraine y Sinha (1989):

$$\sigma = E \cdot \epsilon \cdot \exp(-\epsilon/\epsilon_m) \quad [2.15]$$

Como puede observarse, varias relaciones constitutivas no-lineales para la fábrica han sido empleadas en los diversos estudios sobre el fallo por pandeo en paredes de obra de fábrica. Las diferencias y simplificaciones realizadas por cada autor evidentemente originan cierta dispersión en los resultados obtenidos mediante las diversas soluciones.

2.3.3. Simulaciones mediante MEF

Las soluciones teóricas han mostrado la dificultad que plantea la incorporación de la no-linealidad material, regiones bajo tensiones de tracción (con secciones parcialmente fisuradas), varias condiciones de carga y apoyo, diferentes formas de secciones transversales, etc. Estos inconvenientes podrían ser superados empleando estrategias basadas en el método de los elementos finitos.

Un trabajo pionero en esta área fue llevado a cabo por Payne et al. (1990). A diferencia de los trabajos teóricos, este estudio utiliza el método de los elementos finitos junto con procedimientos de diferencias finitas y permite considerar los efectos combinados de los siguientes factores: rigidización por compresión en las unidades, comportamiento tensión-deformación no-lineal en el mortero, imperfecciones iniciales y desviaciones del alineamiento vertical, y variaciones de las condiciones de apoyo o de la excentricidad de las cargas.

Este enfoque desarrolla ecuaciones de diferencias finitas para un elemento discretizado en $(N-1)$ elementos, siendo N el número de nodos. Luego, establece condiciones de equilibrio seccional de acuerdo con la excentricidad con que actúa la carga vertical y define condiciones de apoyo en los extremos. Finalmente, genera una formulación matricial que resuelve a través de pequeños aumentos (incrementos) de carga. En cada incremento, el enfoque utiliza el método de Newton-Raphson para generar un predictor/corrector que determina los valores de la deflexión lateral y de la rigidez a flexión (EI). Cada incremento de carga permite calcular la diferencia de curvatura entre un nodo y el siguiente. De este modo, el modelo considera que la pared ha fallado si ante un incremento de carga no se detecta diferencia de curvatura entre dos nodos consecutivos. Los resultados obtenidos fueron contrastados con escasa evidencia experimental, mostrando un acuerdo razonable a través de curvas tensión-desplazamiento lateral.

Un enfoque más moderno, basado en la micro-modelización, ha sido empleado por Martini (1997, 1998). El objetivo principal en estos estudios fue la búsqueda de un enfoque adecuado para modelar el comportamiento fuera del plano de muros de obra de fábrica. Ello con el fin de utilizar dicho enfoque en tareas de rehabilitación de construcciones existentes. En este sentido, el propósito estuvo dirigido a simular los efectos del comportamiento bajo cargas fuera del plano tomando en cuenta la condición de apoyo de los bordes verticales. La figura 2.18 muestra la vista frontal y posterior de un modelo deformado soportado en tres de sus bordes.

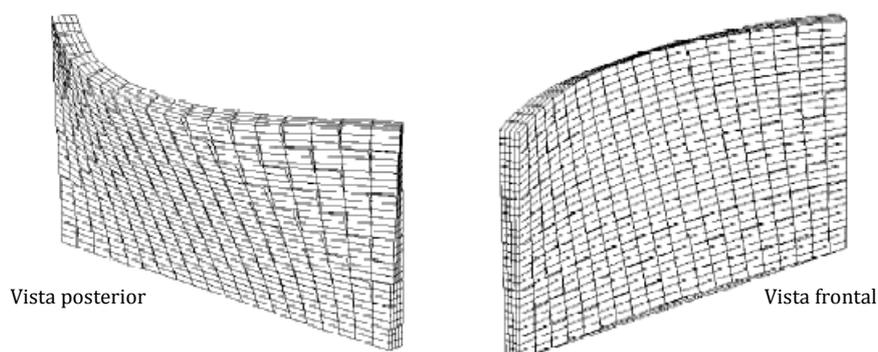


Figura 2.18 – Modelo de un muro soportado en su base y en sus bordes verticales sometido a carga fuera del plano (Martini, 1998).

Empleando esta estrategia, Martini (1997, 1998) consiguió resultados que muestran buen acuerdo con predicciones numéricas reportadas por La Mendola et al. (1995) y con resultados experimentales reportados por Yokel (1971).

La figura 2.19a muestra la forma deformada del modelo generado por Martini (1998) para el caso analizado por La Mendola et al. (1995). Del mismo modo, Martini (1998) simuló uno de los ensayos experimentales llevado a cabo por Yokel (1971) sobre una pared sometida a una carga de compresión vertical estática, seguida de una presión lateral aplicada incrementalmente (figura 2.19b). Notar que en la base del modelo numérico se dispusieron muelles para simular la flexibilidad del apoyo de cartón utilizado en los experimentos. El acuerdo logrado en ambos casos de simulación computacional fue satisfactorio.

De acuerdo con Martini (1998), uno de los aspectos clave en la determinación de la precisión de los modelos generados mediante el MEF es el refinamiento de la malla de elementos finitos empleada (es decir, el número de nodos y elementos finitos del modelo). El autor realizó una comparación entre diversas configuraciones de mallado concluyendo que la cantidad de divisiones en la dirección del espesor del elemento tiene mayor relevancia que el número de divisiones en la dirección de su altura.

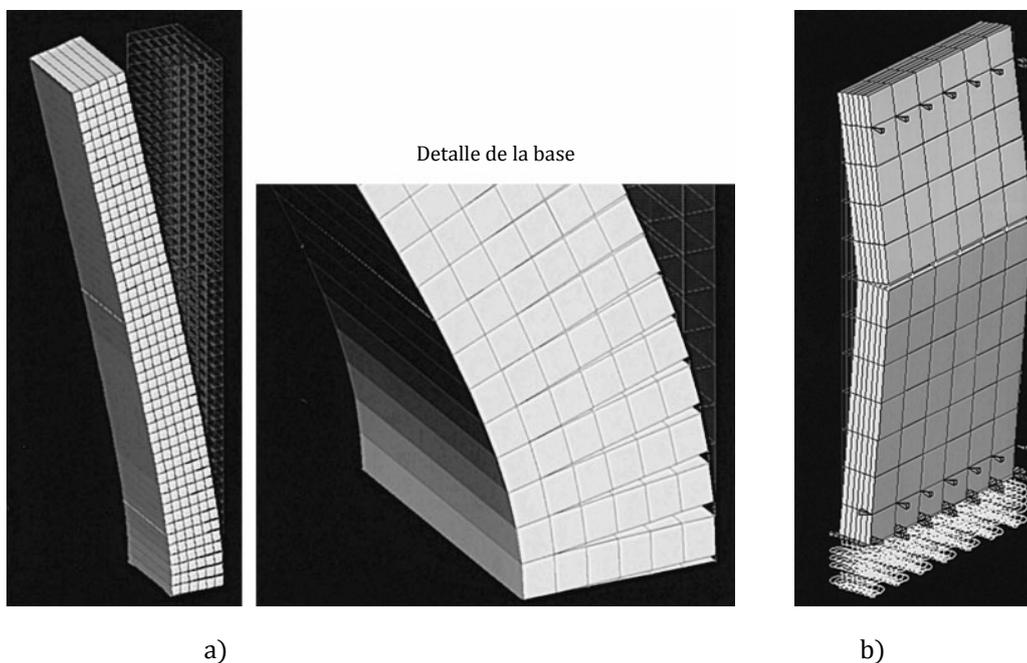


Figura 2.19 - Modelación mediante MEF realizada por Martini (1998) de los casos de estudio considerados por a) La Mendola et al. (1995) y b) Yokel (1971).

Más recientemente, Lu (2003) ha propuesto fórmulas de diseño simple para el chequeo de la estabilidad de elementos esbeltos de obra de fábrica basándose en resultados numéricos obtenidos a partir de un macro-modelo. Las fórmulas de diseño son de uso general y toman en consideración la esbeltez del elemento, la excentricidad de la carga vertical, la resistencia a tracción y la acción de cargas laterales. Las fórmulas simples propuestas por Lu (2003) serán revisadas brevemente en el apartado 2.4.

Los resultados obtenidos por Lu (2003), reportados también en Lu et al. (2004), han sido contrastados con predicciones numéricas sobre elementos sometidos a carga vertical y lateral simultánea obtenidas por La Mendola et al. (1995), Ganduscio y Romano (1997) y Martini (1997), y con resultados experimentales reportados por Bean et al. (2008), obteniendo en todos los casos un buen acuerdo.

Una de las principales aportaciones de Lu (2003) es el estudio de la influencia de algunos parámetros sobre la estabilidad de paredes de carga de obra de fábrica. En particular, la influencia de la resistencia a tracción y de la excentricidad de la carga vertical en paredes esbeltas (en su estudio, al autor sólo emplea un elemento con esbeltez 30 para evaluar estos parámetros).

La figura 2.20a muestra el factor de carga adimensional (P_{cr}/P_E) como función de la excentricidad de la carga. Puede verse que la excentricidad de la carga vertical juega un importante rol en la determinación del valor de la carga de pandeo. Las diversas curvas representan distintos valores de resistencia a tracción empleados en el estudio.

Asimismo, la figura 2.20b muestra el impacto de la resistencia a tracción sobre el factor de carga, que a su vez depende fuertemente de la excentricidad de la carga. Para pequeñas excentricidades (es decir, $e/t \leq 0.1$), la resistencia a tracción no presenta un impacto significativo sobre la capacidad de carga. En este sentido, el caso extremo ocurre para excentricidad nula, donde la resistencia a tracción simplemente no presenta influencia sobre la capacidad de carga. Sin embargo, para una excentricidad mayor ($e/t > 0.1$), los beneficios de una resistencia a tracción no nula son sustanciales.

En la figura 2.20, P_{cr} es la carga crítica de pandeo, P_E corresponde a la carga crítica de Euler, ε_{cr} corresponde a la deformación pico en tracción y ε_0 corresponde a la deformación pico en compresión.

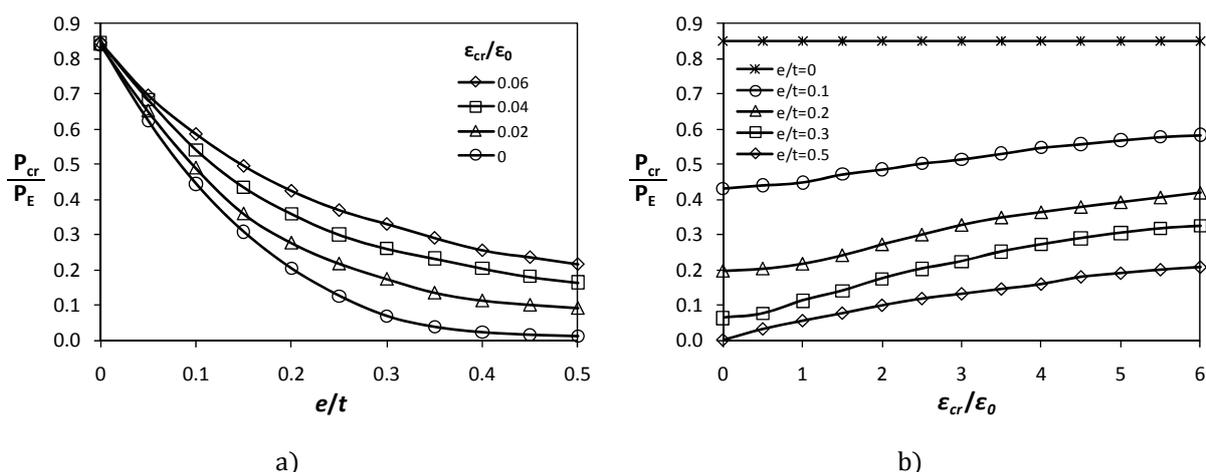


Figura 2.20 - Resultados reportados por Lu (2003) para paredes de esbeltez 30: a) influencia de la excentricidad de la carga, b) influencia de la resistencia a tracción.

2.4. Métodos simples

En la literatura existen algunas propuestas de criterio simple para estimar la capacidad resistente de muros de obra de fábrica considerando el fallo por pandeo. Estas propuestas presentan diversos enfoques en su origen, aunque todas ellas consideran dentro de sus formulaciones la razón de esbeltez del elemento y la excentricidad de la carga vertical, así como también el módulo elástico como propiedad material.

En los siguientes subapartados se revisan brevemente algunas aportaciones de métodos y criterios simples disponibles en la literatura. Esta revisión también alcanza a los métodos normativos vigentes. La revisión se concentra en métodos que permitan estimar la capacidad resistente de elementos bajo únicamente carga vertical centrada o excéntrica.

2.4.1. Métodos y criterios simples

Diversos investigadores han propuesto métodos simples para evaluar la capacidad resistente de paredes de carga de obra de fábrica, algunos de los cuales se revisan a continuación. En particular, son revisadas las aportaciones realizadas por Morton (1990), Knutsson (1991), Glock y Graubner (2003) y Lu (2003).

2.4.1.1. Método propuesto por Morton (1990)

El método propuesto por Morton (1990) -basado en la clásica teoría de Rankine- podría ser aplicado a secciones no rectangulares, donde la razón de esbeltez se expresa en proporción al radio de giro de la pared r . El método no considera la resistencia a tracción del material.

El enfoque empleado en este método combina el fallo por pandeo con el fallo por aplastamiento del material. Para ello, los autores utilizan la relación lineal dada por la ecuación:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{ult}} = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_E} \quad [2.16]$$

y representada gráficamente en la figura 2.21. En esta ecuación, σ_{ult} es equivalente a la resistencia a compresión del material f_c y σ_E es la tensión crítica de pandeo de Euler.

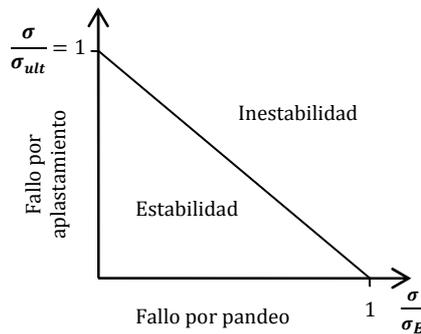


Figura 2.21 - Enfoque empleado en el método de Morton (1990)

Elementos bajo carga concéntrica

Sustituyendo $\sigma_{ult} = f_c$ en la ecuación 2.16 y asumiendo que la estabilidad del elemento se produce para:

$$\frac{\sigma}{f_c} \left(1 + \frac{f_c}{\sigma_E} \right) \leq 1 \quad [2.17]$$

Así, la máxima tensión aplicada sería:

$$\sigma \leq \left(\frac{1}{1 + \frac{f_c}{\sigma_E}} \right) f_c \quad [2.18]$$

La ecuación 2.18 podría ser re-escrita de la siguiente manera, donde Φ se convierte en el factor de reducción por esbeltez.

$$\sigma \leq \Phi \cdot f_c \quad [2.19]$$

El autor asume una relación de $E = 900f_c$, con lo cual la formulación de la ecuación 2.19 queda escrita como:

$$\sigma \leq \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{\delta}} \right) f_c \quad [2.20]$$

donde

$$\delta = 900 \left(\frac{\pi}{h/r} \right)^2 \quad [2.21]$$

Elementos con baja excentricidad de la carga

En este caso, la excentricidad se encuentra dentro del tercio central de la sección transversal, es decir, $0 < e/t \leq 1/6$.

Las consideraciones del fallo por pandeo son las mismas que para el caso centrado. Con respecto al fallo por aplastamiento del material, esta vez no hay una relación directa para la tensión de compresión ya que hay una componente de flexión que también está presente.

Asumiendo un comportamiento lineal entre tensión y deformación, la máxima tensión en un punto a media altura del elemento queda definida como:

$$\sigma \leq \left(\frac{1}{\frac{1 + 3e}{1.1} + \frac{1}{\delta}} \right) f_c \quad [2.22]$$

donde e es la excentricidad de la carga y δ se obtiene a partir de la ecuación 2.21.

Elementos con alta excentricidad de la carga

Para este caso, la carga actúa fuera del tercio central de la sección ($t/3 \geq e > t/6$). El enfoque es el mismo que el empleado para bajas excentricidades, excepto porque se modifica el espesor debido a la fisuración que toma lugar en la sección transversal, ya que el enfoque considera que la fábrica no resiste tensiones de tracción.

Para este caso de carga, la ecuación propuesta para determinar la tensión de rotura es la siguiente:

$$\sigma \leq \left(\frac{1}{\frac{1 + 3e}{1.1} + \frac{1}{\bar{y}^2 \delta}} \right) f_c \quad [2.23]$$

En al anterior expresión, \bar{y} corresponde al espesor de la sección no fisurada. Asumiendo una distribución de tensiones con forma triangular, el parámetro \bar{y} se calcula como:

$$\bar{y} = 3 \cdot \left(\frac{t}{2} - e \right) \quad [2.24]$$

La figura 2.22 muestra los factores de reducción obtenidos a partir del método propuesto por Morton (1990) para una pared con sección transversal rectangular y un módulo elástico $E = 900f_c$. Las curvas correspondientes a las excentricidades $0.05t$, $0.10t$ y $0.15t$ fueron obtenidas a partir de la ecuación 2.22, mientras que las excentricidades $0.2t$ y $0.3t$ fueron obtenidas a partir de la ecuación 2.23.

El método fue contrastado con predicciones obtenidas empleando algunos métodos normativos, pero validado frente a escasa experimentación. En algunas comparaciones, el autor tuvo que modificar la relación entre E y f_c para lograr buenos acuerdos con los datos experimentales. El método es simple y de fácil aplicación.

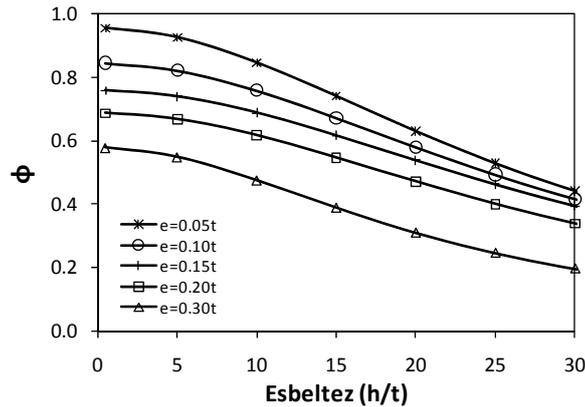


Figura 2.22 – Factores de reducción basados en el método de Morton (1990)

2.4.1.2. Método propuesto por Knutsson (1991)

El método propuesto por Knutsson (1991) se basa en la siguiente ley tensión-deformación:

$$E = E_0 \left(1 - \frac{\sigma}{f_c} \right) \quad [2.25]$$

donde E_0 es el módulo tangente de elasticidad y f_c es la resistencia a compresión del material. El método no considera la resistencia a tracción del material. Esta ecuación es utilizada con frecuencia para estimar el módulo de elasticidad en materiales que no cumplen con la ley de Hooke.

Elementos cargados concéntricamente

Bajo carga concéntrica, las tensiones están uniformemente distribuidas en toda la sección de acuerdo con:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{f_c}{1 + \frac{f_c}{\pi^2 E_0} \left(\frac{h}{r} \right)^2} \quad [2.26]$$

Elementos cargados excéntricamente

Para elementos cargados excéntricamente, Knutsson (1991) asume, por simplicidad, una distribución rectangular uniforme y simétrica de la tensión alrededor de la carga resultante y deja de lado la parte de la sección que queda fuera de los límites de esta distribución (figura 2.23). Empleando este supuesto, la capacidad de carga se puede estimar como si se tratase de un elemento carga concéntricamente con un espesor t' .

$$t' = t - 2e \quad [2.27]$$

Luego, la tensión crítica se calcula a través de la ecuación 2.28, pero considerando un radio de giro modificado de acuerdo con el nuevo espesor efectivo de la sección t' , dado por la ecuación 2.27.

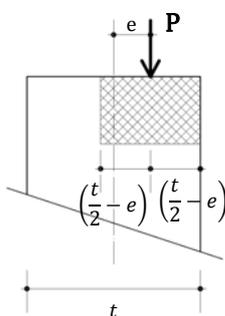


Figura 2.23 – Distribución rectangular de la tensión alrededor de la resultante

De acuerdo con este método, la capacidad de carga de una pared se puede estimar como:

$$\sigma = k_s \cdot k_t \cdot f_c \quad [2.28]$$

donde

$$k_s = \frac{1}{1 + \frac{1}{\pi^2 k_r} \left(\frac{h}{r}\right)^2} \quad [2.29]$$

y $k_r = E/f_c$.

El factor reductor k_t , relacionado con el espesor de la pared, puede tomar los siguientes valores:

- $k_t = 0.8$, para paredes sólidas con $90 < t \leq 125$ mm.
- $k_t = 0.9$, para paredes sólidas con $125 < t \leq 175$ mm.
- $k_t = 1.0$, para paredes con $t > 175$ mm.

Para elementos con sección transversal rectangular, el factor k_s puede reescribirse como:

$$k_s = \frac{1}{1 + \frac{12}{\pi^2 k_r} \left(\frac{h}{t - 2e}\right)^2} \quad [2.30]$$

La figura 2.24a ilustra la variación del factor k_s frente al factor $h/(t - 2e)$ para diferentes relaciones de $k_r = E/f_c$. Por otro lado, la figura 2.24b muestra los factores de reducción obtenidos para una pared de espesor mayor a 175 mm ($k_t = 1.0$) y diversas excentricidades. El valor de k_r adoptado fue igual a 900.

La contrastación del método se realizó contra resultados experimentales de una única campaña. Los datos experimentales corresponden a ensayos sobre paredes a escala real construidas con bloques de hormigón y ladrillo de diferente altura, espesor y excentricidad de la carga. Las predicciones obtenidas a través de la ecuación 2.28 muestran buen acuerdo con estos resultados experimentales.

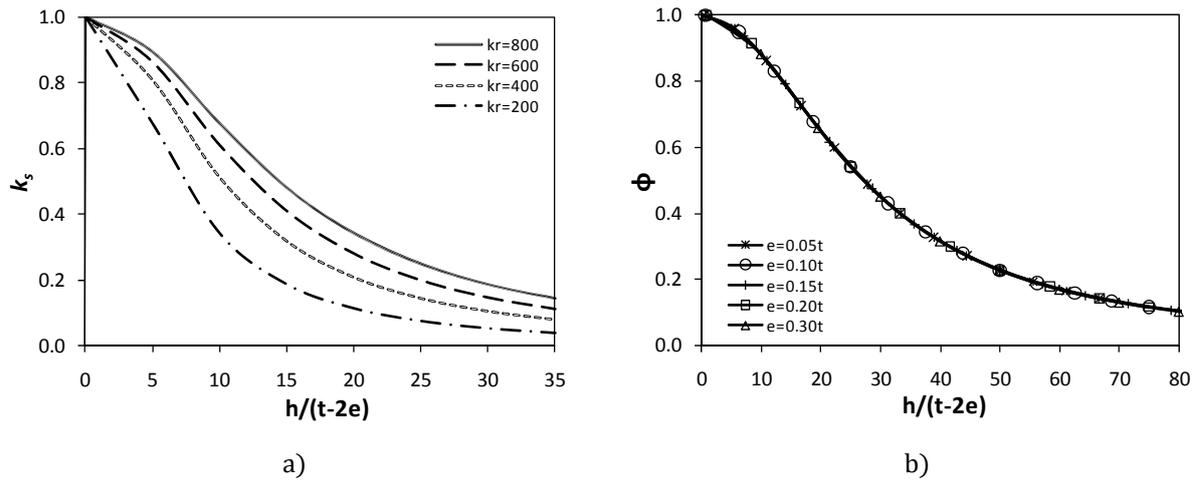


Figura 2.24 - a) Variación del factor k_s calculado de acuerdo a la ecuación 2.30 para diferentes valores de k_r ; b) Factores de reducción obtenidos de acuerdo con el método de Knutsson (1991).

2.4.1.3. Método propuesto por Glock y Graubner (2003)

Glock y Graubner (2003) han propuesto un método simplificado de diseño para paredes de obra de fábrica considerando el comportamiento no-lineal en compresión del material. El método no toma en cuenta la resistencia a tracción.

Los autores proponen comprobar la capacidad de carga en dos pasos. En primer lugar, se comprueba la capacidad a nivel seccional, y luego a nivel de elemento estructural. Sobre la base de un intensivo análisis numérico fueron determinadas aproximaciones para estimar la capacidad de carga de paredes de obra de fábrica mediante ambas comprobaciones.

Para su desarrollo, el método emplea una ley tensión-deformación en compresión del tipo:

$$\frac{\sigma}{f_c} = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^{k_0} \quad [2.31]$$

donde f_c es la resistencia a compresión de la fábrica y ε_f su respectiva deformación unitaria. En tanto, k_0 es el factor que indica el grado de no-linealidad de la curva $\sigma - \varepsilon$. Para el caso de una fábrica construida con unidades de ladrillo macizas, el método sugiere utilizar $k_0 = 2.0$ y $\varepsilon_f = 0.002$.

Comprobación a nivel seccional

La comprobación de la capacidad de carga a nivel seccional está dada por:

$$N_{RI} = \Phi_I \cdot b \cdot t \cdot f_c \quad [2.32]$$

donde

$$\Phi_I = \begin{cases} \frac{1}{1 + \frac{e}{t} \left(2 + \frac{4}{k_0}\right)} & \text{para } \frac{e}{t} \leq \frac{1}{2k_0 + 4} \\ \left(1 - \frac{1}{(k_0 + 1)^2}\right) \cdot \left(1 - 2\frac{e}{t}\right) & \text{para } \frac{1}{2k_0 + 4} < \frac{e}{t} \leq 0.5 \end{cases} \quad [2.33]$$

Comprobación a nivel estructural

Las fórmulas simples que presentan los autores para la comprobación a nivel estructural están basadas en resultados numéricos y toman en cuenta los efectos de segundo orden. De acuerdo con ello, esta comprobación está dada por:

$$N_{RII} = \Phi_{II} \cdot b \cdot t \cdot f_c \quad [2.34]$$

donde

$$\Phi_{II} = k_1 \cdot \left(1 - 2\frac{e}{t}\right) - k_2 \cdot \frac{h}{t} \leq \Phi_I \quad [2.35]$$

$$k_1 = 0.95 \cdot \frac{\ln(0.2k_0 + 0.8)}{(0.2k_0 + 0.8)^4} + 1.05 \quad [2.36]$$

$$k_2 = (0.5 - 0.03k_0) \cdot \sqrt{\varepsilon_f} \quad [2.37]$$

En las ecuaciones anteriores;

b es el ancho de la pared

t es el espesor de la pared

e es la excentricidad de la carga vertical

k_0 es el factor que indica el grado de no-linealidad de la ecuación 2.31.

El método ha sido verificado mediante contrastación con resultados numéricos y predicciones obtenidas a través de métodos normativos. Para bajas excentricidades ($e < 0.15t$), el método entrega resultados con buen acuerdo. Sin embargo, a medida que aumenta la excentricidad de la carga y la razón de esbeltez, dicho acuerdo no resulta del todo satisfactorio. El método incluso llega a estimar factores negativos a partir de ciertas condiciones de esbeltez y excentricidad.

La figura 2.25a muestra la curva $\sigma - \varepsilon$ para $k_0 = 2.0$ y $\varepsilon_f = 0.0025$ obtenida a partir de la ecuación 2.31. Teniendo en cuenta estos parámetros, las ecuaciones 2.33 y 2.35 permiten obtener los factores de reducción que se muestran en la figura 2.25b, para distintas razones de esbeltez y excentricidad.

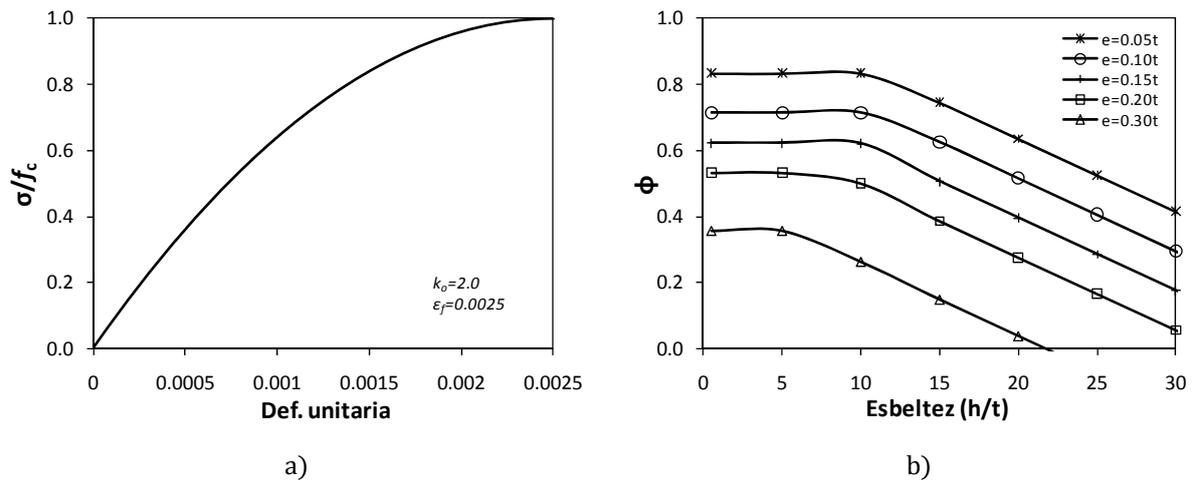


Figura 2.25 - a) Curva $\sigma - \varepsilon$ para $k_0 = 2.0$ y $\varepsilon_f = 0.0025$; b) Factores de reducción obtenidos de acuerdo con el método de Glock y Graubner (2003).

2.4.1.4. Método propuesto por Lu (2003)

Lu (2003) propone un criterio empírico simplificado para el chequeo de la estabilidad de muros de obra de fábrica basado en resultados numéricos obtenidos a partir de un modelo de elementos finitos. El criterio permite adicionar el efecto de cargas laterales por medio de una excentricidad equivalente. También permite tomar en cuenta el efecto de la resistencia a tracción del material.

La fórmula para obtener el factor de reducción por esbeltez y excentricidad de la carga en elementos conformados por unidades sólidas está dada por la expresión:

$$\Phi = \frac{\left(1 - 2\frac{e}{t}\right)^{\Omega_e}}{1 + \varepsilon_0\lambda^2} \exp\left(\frac{\varepsilon_0\lambda^2}{1 + \varepsilon_0\lambda^2}\right) \quad [2.38]$$

con

$$\Omega_e = \frac{3\varepsilon_0\lambda^2 + 0.62}{\varepsilon_0\lambda^2 + 0.62} \quad [2.39]$$

en donde

λ es la razón de esbeltez del elemento (h/t)

ε_0 es el la deformación pico de la fábrica en compresión

e es la excentricidad de la carga vertical

t es el espesor de la pared

Cabe notar que en esta formulación la deformación pico de la fábrica ε_0 podría corresponder a la relación entre el módulo secante de elasticidad y la resistencia a compresión, por tanto es equivalente a:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{E/f_c} \quad [2.40]$$

Para evaluar la contribución de la resistencia a tracción, Lu (2003) propone unas fórmulas que dependen de la deformación pico bajo tensiones de tracción ε_{cr} . El resultado obtenido se suma al factor de reducción que resulta de la ecuación 2.38. Las expresiones para evaluar la resistencia a tracción son las siguientes:

$$\Delta\Phi_t = f_t \begin{cases} \frac{1 - \left(1 - 2\frac{e}{t}\right)^{\Omega_e}}{\frac{6e}{t} \left(1 - \left(1 - 2\frac{e}{t}\right)^{\Omega_e}\right) + \lambda^2 \varepsilon_{cr} + 2 \sqrt{\frac{\left(1 - 2\frac{e}{t}\right)^{\Omega_e}}{\lambda^2 \varepsilon_{cr}}} - 1.1} & \text{si } \lambda^2 \varepsilon_{cr} \leq 0.16 \\ \frac{1 - \left(1 - 2\frac{e}{t}\right)^{\Omega_e}}{\frac{6e}{t} \left(1 - \left(1 - 2\frac{e}{t}\right)^{\Omega_e}\right) + \lambda^2 \varepsilon_{cr} + 2 \sqrt{\frac{\left(1 - 2\frac{e}{t}\right)^{\Omega_e}}{\lambda^2 \varepsilon_{cr}}} - \frac{0.44}{\sqrt{\lambda^2 \varepsilon_{cr}}}} & \text{si } \lambda^2 \varepsilon_{cr} > 0.16 \end{cases} \quad [2.41]$$

La deformación pico bajo tensiones de tracción ε_{cr} se podría estimar a partir de la relación entre el módulo de elasticidad secante y la resistencia a tracción f_t , como sigue:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{1}{E/f_t} \quad [2.42]$$

La figura 2.26 muestra factores de reducción para distintas razones de esbeltez y excentricidad de la carga obtenidos de acuerdo con la ecuación 2.38. Para estas gráficas se ha considerado una relación E/f_c igual a 700.

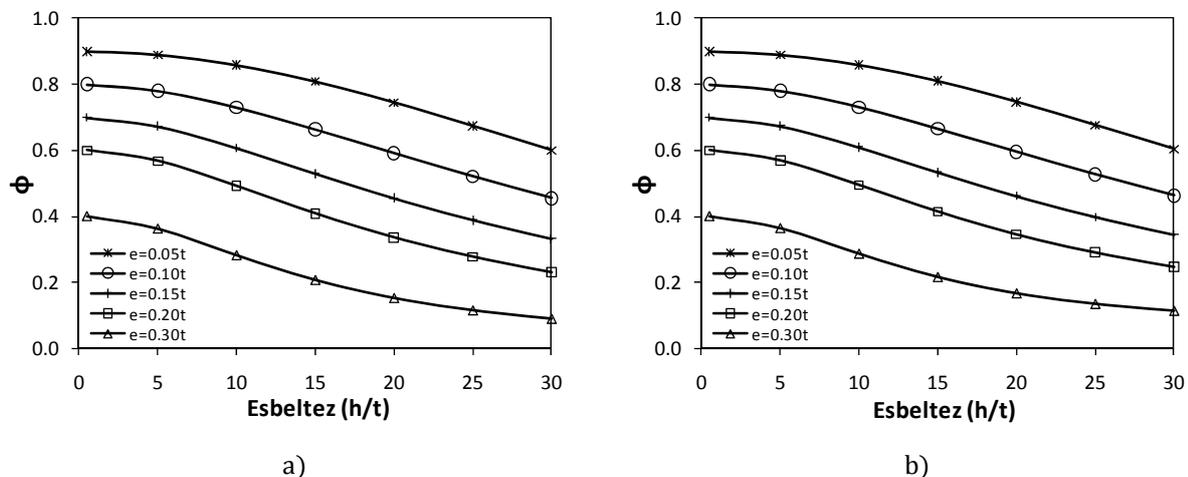


Figura 2.26 - Factores de reducción obtenidos de acuerdo con el método de Lu (2003) considerando una relación $E/f_c = 700$ para: a) resistencia a tracción nula, y b) $f_t/f_c = 8\%$.

2.4.2. Métodos normativos

Debido a la gran variedad de tipos de obra de fábrica y a la necesidad de cada país, existen varios enfoques de diseño normativo en este ámbito. A continuación, se revisan los procedimientos de diseño de acuerdo a la norma europea (EN 1996-1-1:2005) y estadounidense (Masonry Standards Joint Committee, MSJC, 2005).

2.4.2.1. Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005)

De acuerdo con Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005), la capacidad resistente de una pared de obra de fábrica bajo carga vertical depende de su geometría, del efecto de la excentricidad de las cargas verticales aplicadas y de las propiedades de la fábrica. Cabe notar que Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) limita la razón de esbeltez h/t de una pared a una razón igual a 27. Para efectos de cálculo se asume un comportamiento rígido-plástico y se omite la resistencia a tracción del material. La carga vertical de cálculo N_{Rd} está dada por la siguiente fórmula general:

$$N_{Rd} = \Phi_{i,m} \cdot b \cdot t \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \quad [2.43]$$

en donde;

$\Phi_{i,m}$ es el factor de reducción por esbeltez y excentricidad de la carga obtenido como el menor valor entre Φ_i (factor en la base o cima de la pared) y Φ_m (factor en el quinto central).

b es el ancho de la pared

t es el espesor de la pared

f_k es la resistencia a compresión característica de la fábrica, y

γ_M es el coeficiente parcial de seguridad del material.

Cabe notar que, si bien el código señala que se debe estimar el factor de reducción en los extremos superior e inferior, así como en la sección más desfavorable del quinto central, lo cierto es que para un elemento simplemente apoyado y con igual excentricidad en ambos extremos, el factor de reducción siempre será menor en el quinto central debido a los efectos de segundo orden.

Así, en el quinto central de la altura de una pared, el factor de reducción Φ_m puede obtenerse mediante la ecuación siguiente:

$$\Phi_m = \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t}\right) \cdot \exp^{-\left(\frac{u^2}{2}\right)} \quad [2.44]$$

En la anterior expresión, e_{mk} es la excentricidad que actúa en el quinto central de la altura de la pared queda expresada como:

$$e_{mk} = e_m + e_k \geq 0.05t \quad [2.45]$$

donde

e_m es la excentricidad debida a las cargas que actúan sobre la pared e incluye una excentricidad accidental igual a $e_a = h/450$.

e_k es la excentricidad por fluencia, y

t es el espesor de la pared

Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) utiliza, para relaciones entre E y f_c distintas de mil veces ($E \neq 1000f_c$) -como es el caso de varias campañas experimentales (ver apartado 2.5)-, el factor numérico u dado por la siguiente ecuación:

$$u = \frac{\left(\frac{h}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_c}{E}}\right) - 0.063}{0.73 - 1.17 \cdot \frac{e_{mk}}{t}} \quad [2.46]$$

Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) señala además que la mínima excentricidad a considerar para el cálculo resistente de una pared es igual al 5% del espesor del elemento. Cabe notar que la actual normativa española (CTE-DB-SE:F, 2007) utiliza las mismas ecuaciones para estimar los factores de reducción.

Por otra parte, en situaciones de análisis práctico, la excentricidad e_m puede determinarse por medio de métodos generales de análisis estructural, utilizando modelos planos o espaciales. En la mayoría de los casos, para el análisis bajo carga vertical, es suficiente plantear una estructura constituida por elementos de espesor unitario, en la cual paredes y forjados se sustituyen por barras, formando pórticos que idealicen la estructura para su cálculo. De manera simplificada se puede realizar un análisis nudo a nudo, asumiendo comportamiento elástico y secciones no fisuradas, como es propuesto en el anexo C del código.

Cabe hacer notar que las ecuaciones 2.44 y 2.46 tienen su base en los factores de reducción obtenidos a través de la teoría de Kukulski y Lugez (1966). Como ya fue comentado con anterioridad, las soluciones dadas por esta teoría resultan en complejas ecuaciones que son inadecuadas para su uso en diseño, aunque los factores de reducción resultantes puedan ser graficados. Alternativamente, las curvas obtenidas por Kukulski y Lugez (1966) fueron convenientemente ajustadas mediante una fórmula exponencial (ecuación 2.44) que tiene buen acuerdo, pero que no representa una relación matemática directa con las ecuaciones generadas a partir de la teoría original (Hendry, 1998). La figura 2.27 muestra los factores de reducción obtenidos a partir de la ecuaciones 2.44 y 2.46.

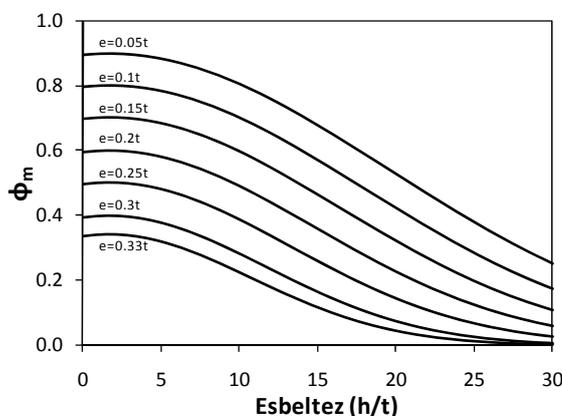


Figura 2.27 - Factores de reducción Φ_m para diferentes excentricidades obtenidos de acuerdo con Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005), para una relación $E = 700f_c$.

2.4.2.2. ACI 530 (MSJC, 2005)

El código ACI 530 (MSJC, 2005) sugiere que, a menos que se obtenga por medio de ensayos experimentales, el módulo de elasticidad para la fábrica sea calculado como $E = 700f_c$ para fábrica de ladrillo o $E = 900f_c$ para fábrica de bloques de concreto, donde f_c es la resistencia a compresión de la fábrica.

Para efectos de diseño de elementos bajo compresión axial, flexión o una combinación de ambas se deberá satisfacer las ecuaciones:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1 \quad [2.47]$$

$$P \leq \frac{P_e}{4} \quad [2.48]$$

donde

$$F_a = \begin{cases} 0.25f_c \left(1 - \left(\frac{h}{140r}\right)^2\right) & \text{para } \frac{h}{r} \leq 99 \\ 0.25f_c \left(\frac{70r}{h}\right)^2 & \text{para } \frac{h}{r} > 99 \end{cases} \quad [2.49]$$

$$F_b = \frac{1}{3}f_c \quad [2.50]$$

$$P_e = \pi^2 \frac{EI}{h^2} \cdot \left(1 - 0.577 \cdot \frac{e}{r}\right)^3 \quad [2.51]$$

En las anteriores ecuaciones r es el radio de giro e I el momento de inercia de la sección transversal neta.

De esta manera, el código ACI 530 (MSJC, 2005) limita la máxima fuerza de compresión que actúa sobre la pared como una forma de proteger contra el uso de una excesiva razón de esbeltez en diseño. Este límite consiste en que la carga de compresión P no exceda la cuarta parte de la carga de pandeo P_e dada por la ecuación 2.51.

2.5. Investigaciones experimentales previas

El estudio experimental del fallo por pandeo en paredes de obra de fábrica recibió especial atención, tanto en España como a nivel internacional, a mediados del siglo XX. Producto de la investigación entonces realizada son distintos documentos científico-técnicos como las recomendaciones PIET70 (1971) –en las cuales se basa el actual el código técnico CTE-DB-SE:F (2007)- y Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005).

A pesar de la atención recibida, el número de estudios experimentales disponibles en la literatura es muy limitado. En particular, sobre el comportamiento de paredes bajo carga vertical destacan los trabajos experimentales llevados a cabo por Structural Clay Products Research Foundation (SCPRF, 1965); Watstein y Allen (1971); Hasan y Hendry (1976); Fattal y Cattaneo (1976); Drysdale y Hamid (1983); Kirtschig y Anstötz (1991); y más recientemente, Cavaleri et al. (2005).

En relación al comportamiento de paredes sometidas a combinaciones de carga vertical y carga horizontal fuera del plano (estáticas, pseudo-dinámicas, dinámicas) destacan los trabajos de Paquette y Bruneau (2003); Doherty et al. (2002); Griffith et al. (2004); Bean et al. (2008) y da Porto et al. (2010). El conjunto de estas investigaciones ha contribuido al desarrollo de factores de reducción por efecto de la esbeltez del elemento y de la excentricidad de la carga.

A continuación se revisan campañas experimentales llevadas a cabo sobre paredes bajo únicamente carga vertical centrada o excéntrica. En particular, se revisan estudios que hayan investigado el comportamiento al pandeo variando la razón de esbeltez y la excentricidad de la carga.

2.5.1. Hasan y Hendry (1976)

Hasan y Hendry (1976) llevaron a cabo una campaña experimental de paredes de obra de fábrica de ladrillo empleando modelos a escala reducida 1:3. El objetivo del estudio era determinar si los factores de reducción de varios códigos de diseño europeos de la época eran conservadores.

Los experimentos incluyeron ensayos bajo tres condiciones de apoyo: extremo empotrado – extremo articulado; extremos bi-empotrados y extremos bi-articulados. Los resultados considerados en este apartado serán los de extremos bi-articulados.

Las razones de esbeltez estuvieron comprendidas entre 6 y 25, en tanto que las excentricidades de la carga fueron $e = 0$; $e = t/6$ y $e = t/3$.

Materiales

Para la construcción de las probetas se utilizó piezas macizas de ladrillo con resistencia promedio de 28 N/mm², y mortero con relación 1:3 (cemento:arena), para una relación agua-cemento que varió entre 0,8 y 0,95. Todos los muros fueron construidos en aparejo trabado utilizando plantillas de madera para asegurar el alineamiento vertical. Asimismo, los muros fueron curados bajo polietileno hasta un mínimo de 7 días antes de ser ensayados.

En relación a la resistencia a compresión y módulo de Young de la fábrica, los autores reportan varios resultados que dependen básicamente de la esbeltez y la condición de apoyo del ensayo. De los resultados reportados se puede inferir que la resistencia a compresión puede estar contenida entre 13.1 y 19.5 N/mm². Asimismo, el módulo elástico puede estar contenido entre 2940 y 12600 N/mm². Los valores experimentales reportados dan una relación experimental para el módulo elástico de entre 207 y 887 veces la resistencia a compresión.

Los autores no reportan información referente a resistencia a tracción unidad-mortero, módulo elástico de las unidades y del mortero. Asimismo, tampoco reportan diagramas tensión-deformación o tensión-deflexión lateral de los ensayos que llevaron a cabo.

Procedimiento y técnicas empleadas

La carga vertical fue aplicada mediante un gato hidráulico utilizando una célula de carga para su control por desplazamiento.

Las deformaciones verticales fueron medidas mediante compresómetros y galgas de diferentes longitudes dependiendo de la altura del muro. La deflexión lateral fue mediada mediante galgas con una sensibilidad de 0,00254 mm. También fueron medidas las rotaciones en los apoyos, para lo cual se utilizó el esquema que se observa en la figura 2.28. Cabe destacar que el reporte no hace mención a cómo fue definida la excentricidad de la carga y cómo se materializó el mecanismo articulado en ambos extremos.

A pesar de que los autores reportan resultados para tres condiciones de apoyo, no presentan esquemas de cómo dichas condiciones fueron materializadas en la práctica.

Resultados

El comportamiento experimental reportado por los autores para las esbelteces 6 y 12 mostró un modo general de rotura por deslizamiento vertical (splitting), acompañado de aplastamiento (crushing) y astillamiento (spalling), sin trayectorias muy definidas. En cambio, en los muros de esbeltez 18 y 25 y excentricidad $e = t/6$, así como en la totalidad del grupo de muros con excentricidad $e = t/3$, el fallo tuvo lugar en la interface unidad-mortero debido a la separación de la junta entre el mortero y la unidad al tiempo de la máxima deflexión a media altura.

La deflexión lateral medida mostró que ninguna de las paredes de un mismo grupo deflectó una similar extensión. Además, los autores concluyen que parece no haber una relación consistente entre carga aplicada v/s rotación.

Las tensiones de rotura obtenidas por Hasan y Hendry (1976) se presentan en la tabla 2.1, incluyendo los valores medios (\bar{x}) y el coeficiente de variación (CV). El resumen de resultados también se presenta gráficamente en la figura 2.29.

Las conclusiones obtenidas por los autores son escasas y fundamentalmente están relacionadas con los coeficientes de reducción señalados por la normativa de la época. Además, destacan que es necesaria una mayor cantidad de ensayos para validar alguna metodología.

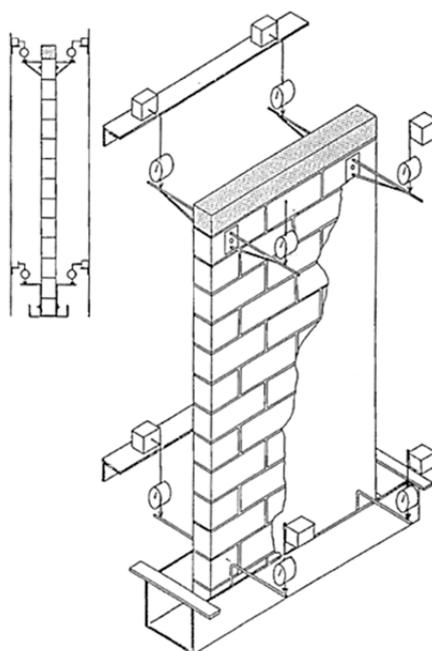


Figura 2.28 – Configuración ensayo llevado a cabo por Hasan & Hendry (1976)

Tabla 2.1 – Resultados experimentales obtenidos por Hasan y Hendry (1976). Tensiones en N/mm^2

Muro Nº	Razón de Esbeltez h/t	Excentricidad								
		e=0			e=t/6			e=t/3		
		σ	\bar{x}	CV	σ	\bar{x}	CV	σ	\bar{x}	CV
W6-1	6.0	13.1			9.8			5.0		
W6-2	6.0	14.2	13.8	4.8%	9.3	9.7	4.2%	3.6	4.2	17.2%
W6-3	6.0	14.2			10.0			3.9		
W12-1	12.0	11.7			7.5			2.0		
W12-2	12.0	12.7	12.5	6.1%	8.4	7.8	6.3%	2.6	2.0	27.3%
W12-3	12.0	13.2			7.5			1.5		
W18-1	18.0	10.6			5.3			1.2		
W18-2	18.0	13.0	11.7	10.3%	4.7	5.2	9.7%	0.9	1.2	25.7%
W18-3	18.0	11.6			5.7			1.5		
W25-1	25.0	8.0			4.3			0.8		
W25-2	25.0	9.5	8.2	15.4%	5.4	4.4	20.4%	1.1	0.9	15.2%
W25-3	25.0	7.0			3.6			0.9		

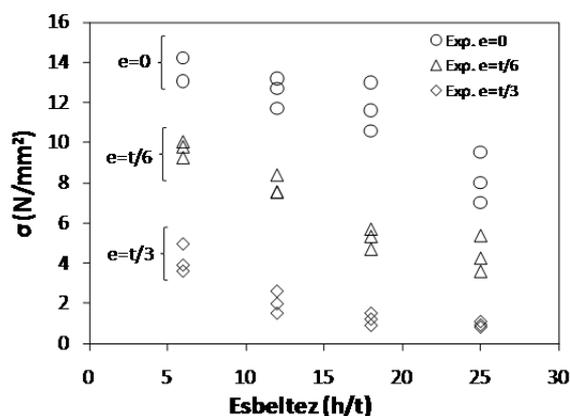


Figura 2.29 - Tensión de compresión contra razón de esbeltez (basada en Hasan y Hendry, 1976)

2.5.2. Watstein y Allen (1971)

Watstein y Allen (1971) llevaron a cabo ensayos a compresión sobre prismas y paredes a escala real construidas tanto con mortero de alta adherencia como con mortero portland convencional.

El objetivo de la investigación fue estudiar el efecto de la esbeltez y la excentricidad en muros a escala real construidos con dos tipos de mortero (de alta adherencia, designado como "HB", y portland convencional, designado como "S"). De acuerdo con los autores, cualquier aumento en la resistencia a tracción de la obra de fábrica, a través de una mejora en la adherencia unidad-mortero, incrementará la resistencia a compresión y corte de la fábrica.

Las razones de esbeltez ensayadas fueron 12,4; 22,8; 32,0 y 42,5.

Materiales

En el estudio experimental se incluyeron 6 tipos diferentes de ladrillo, todos huecos. Las resistencias a compresión de las unidades variaron entre 54 MPa y 174 MPa. Sin embargo, en la construcción de las paredes a escala real únicamente se emplearon unidades de ladrillo designadas como "control", cuya resistencia a compresión fue de 76.5 N/mm².

El mortero convencional empleado, de resistencia a compresión promedio 10.9 N/mm², contuvo 1 parte de cemento portland, ½ parte de limo y 4½ de arena por volumen. Mientras tanto, el mortero de alta adherencia, de resistencia a compresión promedio 41.6 N/mm², fue mezclado en proporciones, tal que la mezcla tuviera la trabajabilidad deseable. Cabe hacer notar que todos los muros fueron curados al aire en laboratorio y fueron ensayados en triplicado a la edad de 28 días.

Procedimiento y técnicas empleadas

Las probetas fueron ensayadas como elementos bi-articulados. Cabe destacar que el extremo inferior se mantuvo centrado y el extremo superior fue cargado axialmente empleando excentricidades $e = 0$, $e = t/6$ y $e = t/3$. La manera en que fueron considerados los apoyos y la forma en que se aplicó la carga se muestra en la figura 2.30a. En tanto, en la figura 2.30b se observa parte de la instrumentación utilizada en los ensayos, así como también el marco de prueba empleado.

Cada pared ensayada se instrumentó para medir el acortamiento vertical y en aquellos con esbeltez igual o superior a 22,8 también fueron instrumentados para medir la deflexión lateral en tres puntos de su altura. En cada grupo también fueron elaborados pequeños prismas que más tarde fueron ensayados e instrumentados para determinar el módulo de elasticidad.

Se construyeron y ensayaron un total de 36 muros con mortero de alta adherencia. A modo de ensayos de control también se ensayaron 3 muros fabricados con mortero tipo S (mortero convencional) correspondientes a la esbeltez 22.8.

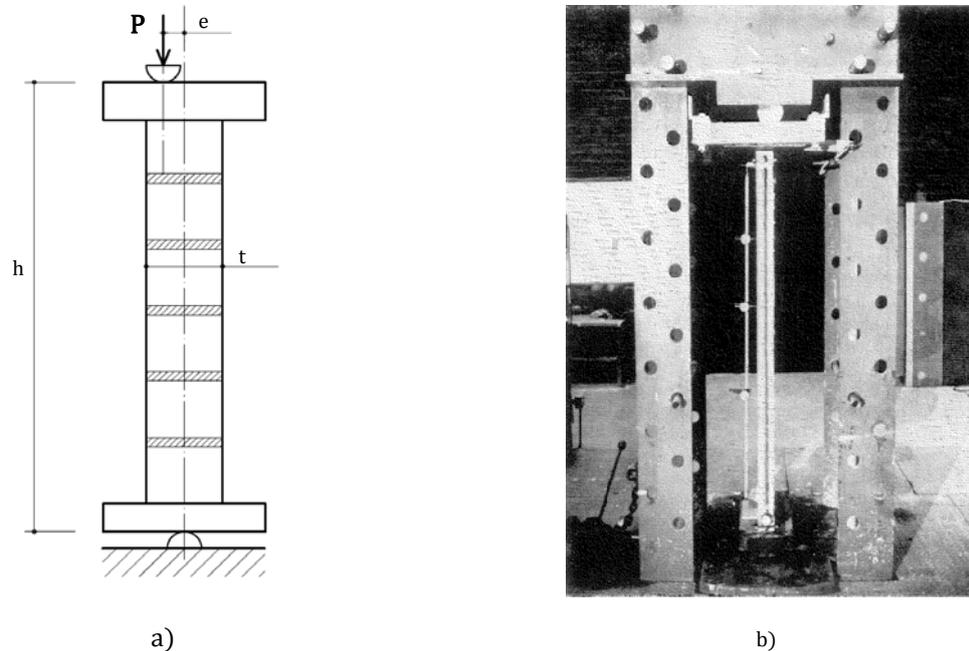


Figura 2.30 - Configuración de los ensayos de Watstein y Allen (1971): a) esquema de carga y apoyo; b) vista de una pared lista para ensayar.

Resultados

La tabla 2.2 presenta un resumen de los resultados experimentales obtenidos, incluyendo los valores promedio (\bar{x}) y el coeficiente de variación (CV). Además, los mismos resultados se presentan gráficamente en la figura 2.31. La resistencia a compresión promedio medida sobre prismas fue de 39.2 N/mm^2 y el módulo de Young fue de 21167 N/mm^2 . Estos valores dan una relación experimental de $E = 540f_c$.

Los autores midieron la deflexión lateral en paredes con razones de esbeltez 22,8; 32,0 y 42,5. Las deflexiones fueron determinadas mediante tres micrómetros diales montados sobre un marco que se adhirió a la pared sobre el lado convexo. La localización de la sección de máxima deflexión lateral fue esencialmente la misma en las paredes de igual altura, tanto para excentricidades de $t/6$ y $t/3$.

La figura 2.32 ilustra la relación entre la tensión de compresión promedio en paredes con mortero de alta adherencia y los valores pico de las deflexiones laterales para $e = t/6$ y $e = t/3$. Una de las principales conclusiones de este estudio es que la resistencia a compresión de paredes construidas con mortero de alta adherencia, con razón de esbeltez de 22,8, resultó entre un 25 y 33% superior que las paredes construidas con mortero convencional, para excentricidades de $e = t/6$ y para $e = t/3$, respectivamente.

Otra importante conclusión que se puede deducir de este estudio es que para paredes con igual razón de esbeltez e igual deflexión lateral, la resistencia a compresión promedio es entre un 40 y un 60% superior en paredes con excentricidad $e = t/6$ que para paredes con $e = t/3$.

Además, los autores reportaron resultados de ensayos a tres puntos de resistencia a flexo-tracción realizados sobre pequeñas probetas. El resultado promedio obtenido a través de dichos ensayos fue de $f_{xt} = 2.98 \text{ N/mm}^2$.

Tabla 2.2 - Resultados experimentales obtenidos por Watstein y Allen (1971). Tensiones en N/mm^2

Muro Nº	Razón de Esbeltez h/t	Excentricidad								
		e=0			e=t/6			e=t/3		
		σ	\bar{x}	CV	σ	\bar{x}	CV	σ	\bar{x}	CV
HB-10-1	12.4	34.5			24.0			17.1		
HB-10-2	12.4	35.6	34.7	2.2%	21.2	23.8	10.6%	15.6	15.7	8.6%
HB-10-3	12.4	34.1			26.3			14.4		
HB-20-1	22.8	23.9			17.0			8.7		
HB-20-2	22.8	25.2	24.3	3.0%	15.9	16.4	3.7%	7.9	8.1	5.9%
HB-20-3	22.8	24.0			16.3			7.8		
HB-30-1	32.0	15.9			9.9			4.4		
HB-30-2	32.0	15.2	15.3	3.5%	7.7	9.2	14.7%	4.6	4.7	8.6%
HB-30-3	32.0	14.9			10.1			5.2		
HB-40-1	42.5	7.9			6.2			3.3		
HB-40-2	42.5	8.4	8.5	8.1%	6.0	6.2	4.1%	3.4	3.5	8.3%
HB-40-3	42.5	9.2			6.5			3.8		

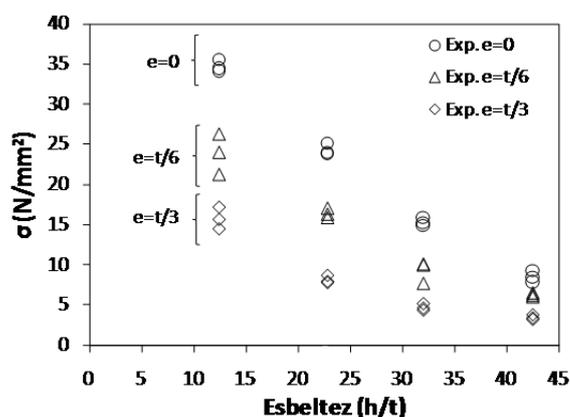
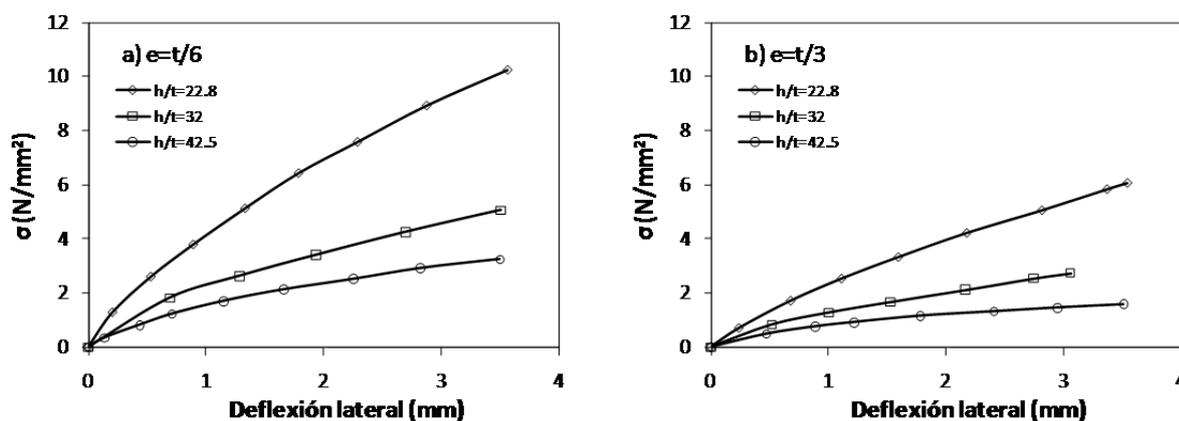


Figura 2.31 - Tensión de compresión contra razón de esbeltez (basada en Watstein & Allen, 1971)

Figura 2.32. Relación entre la tensión de compresión promedio y el valor pico de las deflexiones laterales para a) $e = t/6$ y b) $e = t/3$ (basada en Watstein y Allen, 1971)

2.5.3. Kirtschig y Anstötz (1991)

Kirtschig y Anstötz (1991) llevaron a cabo ensayos sobre paredes a escala real para diferentes combinaciones de esbeltez y excentricidad.

Las paredes construidas tuvieron un ancho aproximado de 1 mt y espesor de 115 mm. Todas las paredes fueron construidas y ensayadas en duplicado.

Las razones de esbeltez evaluadas fueron 5.6; 11.1; 18.8 y 27.7. La carga vertical uniformemente distribuida en el ancho de la pared fue aplicada de acuerdo con las excentricidades $e = 0$; $e = t/8$; $e = t/4$ y $e = t/3$. La excentricidad fue similar en ambos extremos.

Materiales

Para la construcción de las paredes se utilizó mortero convencional de resistencia a compresión promedio de 5 N/mm². Las unidades empleadas fueron de silicato cálcico y con agregado ligero. A efectos del presente estudio únicamente se consideran los experimentos llevados a cabo con las primeras unidades.

Los autores no reportan un valor de resistencia a compresión del material compuesto, por lo que éste se estima a partir de ensayos realizados sobre probetas de esbeltez 5.6, carga concéntrica y apoyo directo sobre platos en ambos extremos. De esta manera, la resistencia a compresión considerada para los experimentos es de $f_c = 12.2$ N/mm². Del mismo modo también se obtuvo el módulo de elasticidad $E = 8540$ N/mm². Estos valores dan una relación experimental de $E = 700f_c$. Sin embargo, en Glock (2003), el valor asignado a la deformación pico en compresión fue de 1.7‰, lo que equivale a una relación igual a $E/f_c = 588$.

Procedimiento y técnicas empleadas

La configuración del ensayo es el que se muestra en la figura 2.33. Los autores no reportan información referida a curvas tensión-deformación o tensión-deflexión lateral. Tampoco hay reporte respecto de modos de fallo observados durante los experimentos.

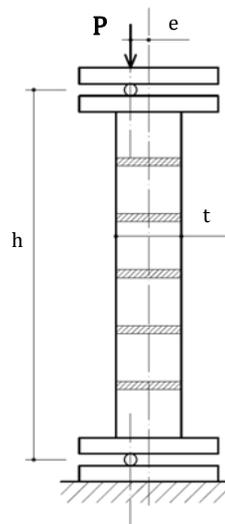


Figura 2.33 - Configuración de los ensayos de Kirtschig y Anstötz (1991)

Resultados

La tabla 2.3 presenta un resumen de los resultados experimentales obtenidos, incluyendo los valores promedio (\bar{x}) y el coeficiente de variación (CV). Además, los mismos resultados se presentan gráficamente en la figura 2.34.

Tabla 2.3 - Resultados experimentales obtenidos por Kirtschig y Anstötz (1991). Tensiones en N/mm^2

Razón de Esbeltez	Excentricidad											
	e=0			e=t/8			e=t/4			e=t/3		
	h/t	σ	\bar{x}	CV	σ	\bar{x}	CV	σ	\bar{x}	CV	σ	\bar{x}
5.6	12.6	12.2	5.1%	9.1	8.7	7.1%	6.0	5.5	11.1%	2.9	3.1	10.8%
5.6	11.7			8.3			5.1			3.3		
11.1	10.7	10.8	2.6%	7.8	7.7	3.2%	3.5	3.8	10.6%	1.5	1.4	11.7%
11.1	11.0			7.5			4.0			1.3		
18.8	10.2	9.7	7.0%	4.0	4.6	18.7%	1.9	1.8	3.4%	1.2	1.1	11.0%
18.8	9.2			5.2			1.8			1.0		
27.7	6.2	5.8	10.1%	2.1	2.2	8.3%	0.70	0.7	3.4%	0.30	0.3	6.3%
27.7	5.3			2.3			0.73			0.28		

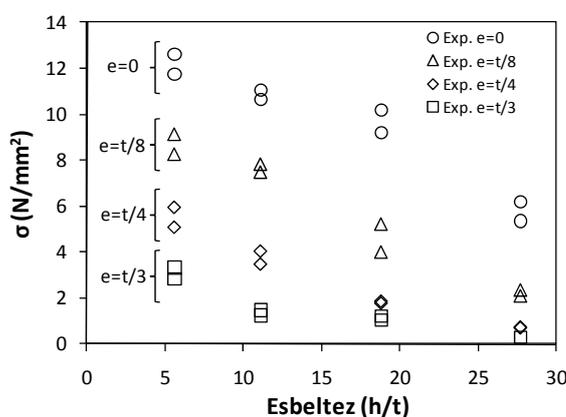


Figura 2.34 - Tensión de compresión contra razón de esbeltez (basada en Kirtschig y Anstötz, 1991)

2.5.4. Fattal y Cattaneo (1976)

Fattal y Cattaneo (1976) investigaron el comportamiento experimental de paredes de obra de fábrica a escala real bajo compresión y flexión.

Las paredes fueron construidas en aparejo trabado, empleando una única configuración geométrica. La sección transversal tuvo un ancho de 0.8 mt y un espesor de 0.1 mt. Mientras que la altura aproximada de las paredes fue 2.4 mt. Estos valores dan una razón de esbeltez igual a 24.

Los autores emplearon tres tipos de unidades: una unidad de ladrillo hueco y dos unidades de bloque de concreto, también huecos. Los resultados aquí considerados serán únicamente los obtenidos en paredes construidas con unidades de ladrillo.

Las excentricidades ensayadas fueron $e = 0$; $e = t/12$; $e = t/6$ y $e = t/3$.

Materiales

El tipo de ladrillo empleado tuvo una resistencia a compresión promedio de $90.2 N/mm^2$. El mortero utilizado en todas las paredes fue mezclado en proporciones $1:1/2:4 1/2$ (cemento, limo y arena, respectivamente). La resistencia a compresión promedio de dicho mortero fue de $10.7 N/mm^2$.

Utilizando pequeños prismas, los autores caracterizaron la resistencia a compresión de la fábrica ($f_c = 31.1 N/mm^2$) y su módulo de Young ($E = 19282 N/mm^2$). Los valores obtenidos permiten estimar una relación experimental de $E = 620 f_c$.

Procedimiento y técnicas empleadas

La configuración del ensayo permitió la rotación en ambos extremos de la pared (condición de apoyo articulada). La carga vertical fue aplicada sobre el extremo superior mediante una prensa hidráulica con capacidad para 2600 kN. Todas las paredes fueron ensayadas a una edad promedio de 120 días, con un rango que comprendió entre 70 y 160 días.

Las deflexiones laterales fueron registradas a través de LVDT's adheridos a un marco de aluminio especialmente diseñado para los ensayos. Las posiciones de estos transductores de desplazamiento fueron a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la altura de la pared bajo ensayo. La deformación vertical fue registrada a través de un transductor ubicado dentro de la célula de carga de la prensa hidráulica.

Resultados

El resumen de resultados obtenidos se presenta en la tabla 2.4. Además, los mismos resultados se presentan gráficamente en la figura 2.35.

En algunos casos, la deflexión lateral a media altura no fue registrada ya que la instrumentación fue removida para evitar posibles daños. Las paredes ensayadas bajo carga concéntrica exhibieron desprendimiento de material y fisuras verticales que se desarrollaron en el espesor del elemento. Con el incremento de la excentricidad de la carga, la rotura ocurrió por fallo en la adherencia unidad-mortero a lo largo de una junta horizontal ubicada aproximadamente a media altura de la pared.

Tabla 2.4 - Resultados experimentales (Fattal y Cattaneo, 1976)

Pared designación	Esbeltez h/t	Excentricidad e/t	σ (N/mm ²)
4A1	24	0	18.8
4A2	24	0	19.7
4A9	24	1/12	10.3
4A10	24	1/12	10.3
4A3	24	1/6	6.6
4A4	24	1/6	6.9
4A5	24	1/3	2.4
4A6	24	1/3	1.4

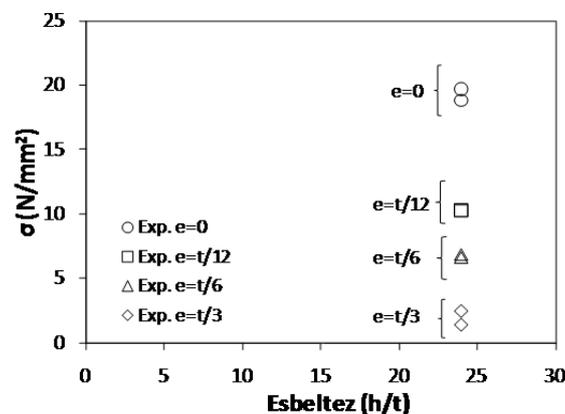


Figura 2.35 - Tensión de compresión contra razón de esbeltez (basada en Fattal y Cattaneo, 1976)

2.5.5. Structural Clay Products Research Foundation (1965)

La investigación experimental llevada a cabo por el Structural Clay Products Research Foundation (SCPRF, 1965) consistió en llevar a cabo ensayos sobre muros-columna a escala real bajo cargas de compresión y cargas transversales.

Las paredes fueron construidas en aparejo trabado. Las dimensiones de la sección transversal de las paredes construidas fue de 610 x 101.6 mm². El espesor de las juntas de mortero fue de aproximadamente 10 mm. Se emplearon tres tipos de unidades de ladrillo, todas con perforaciones: una de baja resistencia a compresión (designada como "L"), una con alta resistencia a compresión (designada como "H") y una unidad con una resistencia a compresión media (designada como "M"). Los resultados aquí considerados serán únicamente los obtenidos en paredes construidas con unidades tipo "M".

Las razones de esbeltez consideradas en los experimentos fueron 10.9; 17.4; 26.8; 34.1; 41.3 y 51.3. Todas las paredes fueron construidas y curadas en ambiente de laboratorio, y ensayadas a una edad superior a 28 días.

Materiales

El ladrillo tipo "M" presentó una resistencia a compresión promedio de 73.8 N/mm². El mortero utilizado fue mezclado en proporciones 1:½:4½ (cemento, limo y arena, respectivamente) y su resistencia a compresión promedio fue de 9.6 N/mm².

Empleando pequeños prismas los autores caracterizaron la resistencia a compresión de la fábrica ($f_c = 40.7$ N/mm²) y el módulo de Young ($E = 16893$ N/mm²). Los valores obtenidos permiten estimar una relación experimental de $E = 415f_c$.

Procedimiento y técnicas empleadas

Todas las paredes fueron ensayadas en una prensa hidráulica con capacidad aproximada para 4450 kN. Cada pared fue instrumentada para registrar el acortamiento vertical y la deflexión lateral a media altura mediante LVDT's. La configuración de los ensayos fue de apoyo simple entre platos en ambos extremos, considerando excentricidad nula.

Después de alcanzar tres cuartos de la carga última estimada, la instrumentación fue retirada para prevenir daños. La velocidad de aplicación de carga fue de aproximadamente 1.3 mm por min.

Resultados

El resumen de resultados obtenidos se presenta en la tabla 2.5. Además, los mismos resultados se presentan gráficamente en la figura 2.36.

En la mayoría de los experimentos, el modo típico de fallo fue por abertura a lo largo de una junta horizontal a media altura al momento de máxima deflexión lateral. Las paredes con esbeltez superior a 30 fallaron por pandeo simple sin presentar desprendimiento de material por aplastamiento en el lado comprimido.

De acuerdo con los autores, el efecto de la razón de esbeltez queda reflejado en la figura 2.36. Otros aspectos estudiados en este reporte están relacionados con la incidencia de la resistencia compresión de las unidades y del mortero. En ambos casos, concluyen que tienen un efecto notable en la resistencia a compresión de la fábrica y obviamente sobre el modo de fallo por aplastamiento del material a bajas razones de esbeltez.

Tabla 2.5 - Resultados experimentales (SCPRF, 1965)

Pared designación	Esbeltez h/t	σ (N/mm ²)
C3-1	10.9	35.8
C3-2	10.9	31.1
C3-3	10.9	33.9
C3-4	10.9	29.9
C3-5	10.9	34.6
C5-2	17.4	33.2
C5-3	17.4	28.5
C5-4	17.4	33.2
C5-5	17.4	30.0
C8-1	26.8	32.4
C8-2	26.8	31.0
C8-3	26.8	30.6
C8-4	26.8	27.6
C8-5	26.8	27.0
C10-1	34.1	31.6
C10-2	34.1	31.5
C10-3	34.1	26.8
C10-4	34.1	27.0
C10-5	34.1	29.9
C12-1	41.3	28.0
C12-2	41.3	24.0
C12-3	41.3	21.0
C12-4	41.3	23.9
C12-5	41.3	25.3
C15-1	51.3	19.0
C15-2	51.3	15.8
C15-3	51.3	17.8
C15-4	51.3	21.7
C15-5	51.3	21.1

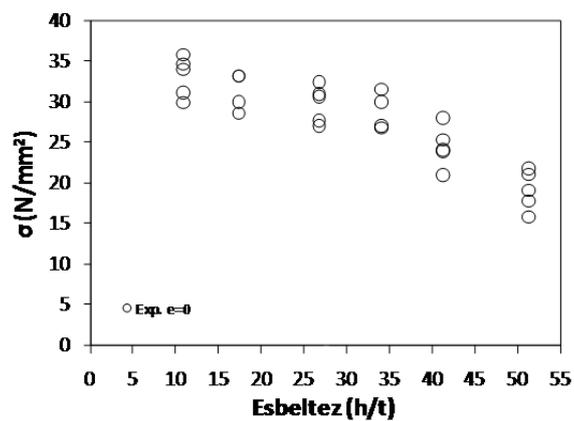


Figura 2.36 - Gráfica tensión de compresión vs razón de esbeltez (basada en SCPRF, 1965)

2.6. Estrategias de modelización numérica

Existen diversas estrategias para analizar estructuras y elementos de obra de fábrica. Dentro de los principales métodos disponibles destacan el análisis límite, algunos criterios y métodos simples, métodos basados en elementos discretos y los enfoques de micro y macro-modelización basados en el MEF. La utilización de un método u otro depende, entre otros aspectos, de la precisión buscada, de la disponibilidad de datos de entrada para el modelo, de la capacidad computacional y del realismo de los resultados buscados. Un completo estado del conocimiento respecto de las principales estrategias de análisis disponibles para estructuras de obra de fábrica ha sido reportado recientemente por Roca et al. (2010).

El método de los elementos finitos (MEF) ofrece una amplia variedad de posibilidades dentro del marco del análisis no-lineal. La mayoría de estas posibilidades pueden agruparse en dos grandes enfoques: micro y macro-modelización. A continuación se revisan brevemente ambos enfoques.

2.6.1. Macro-modelización

La macro-modelización es, probablemente, la herramienta de más amplio uso para el análisis de estructuras de obra de fábrica hoy en día. En este tipo de modelos el material es continuo y homogéneo, por lo cual el comportamiento se puede definir en términos de tensiones y deformaciones continuas, evitando de esta forma la simulación del comportamiento de los componentes por separado así como la interacción que pueda existir entre ellos. El MEF es uno de los más apropiados para el planteamiento de macro-modelos.

El empleo de macro-modelos es práctico porque, entre otras cosas, requiere menos parámetros para caracterizar el comportamiento del material -la obtención de estos parámetros es relativamente sencilla- y el tiempo de procesamiento computacional es relativamente reducido frente a otros enfoques más complejos. Su uso es adecuado para análisis y evaluaciones de orientación práctica, particularmente de grandes elementos o configuraciones estructurales o bien, de construcciones completas.

La macro-modelización es claramente una aproximación fenomenológica, en la que los parámetros del material homogeneizado deben obtenerse de ensayos de probetas de obra de fábrica que deben ser suficientemente grandes y estar sometidas a estados tenso-deformacionales homogéneos.

Los modelos constitutivos no-lineales para el análisis estructural de la obra de fábrica a través de macro-modelos suelen estar basados principalmente en la plasticidad y en la teoría del daño. Una de las características principales que tendría que incluir el modelo constitutivo no-lineal empleado es la diferencia entre el comportamiento a tracción y a compresión del material. En Lourenço (1996a) se presenta una formulación de un modelo de plasticidad anisótropo, con un criterio de fluencia compuesto, adecuado para modelar el comportamiento de materiales en tensión plana. Para ello, el autor utiliza el criterio de Rankine modificado para tracción y el criterio de Hill-modificado para compresión, lo que se traduce en procesos de fractura localizados en el primer caso, y procesos de daño más distribuidos en el segundo. Una combinación de modelos constitutivos que también suele emplearse en el análisis con materiales cuasi-frágiles, como lo son las estructuras de obra de fábrica, es el modelo de daño distribuido (Weihe et al., 1998) para el régimen a tracción del material y el modelo de plasticidad de Drucker-Prager propuesto inicialmente por Drucker et al. (1957) para el régimen a compresión. Una propuesta más reciente, basada en la teoría del daño, puede encontrarse en Pelà (2009).

El empleo de la estrategia de macro-modelización en estudios del comportamiento al pandeo de paredes o columnas de obra de fábrica ha sido escaso. Lu (2003) ha implementado un modelo de elementos finitos bidimensional donde la obra de fábrica es tratada como un material homogéneo con algo de resistencia a tracción.

2.6.2. Micro-modelización

Los llamados micro-modelos simulan el comportamiento de las unidades y de las juntas por separado, acoplando las ecuaciones correspondientes para obtener una respuesta global del material compuesto. La filosofía del método consiste en considerar cada unidad como un continuo, rígido o deformable, definiendo en las interfaces entre ellas algún mecanismo de interacción que represente las juntas de mortero. Dichas juntas se pueden modelar de dos maneras:

- i. Considerando su comportamiento constitutivo. Es decir, se definen las juntas de forma finita, especificando su espesor y tomando en cuenta su deformación, además de la interacción unidad-mortero (figura 2.37a); o
- ii. Definiendo solamente la interacción unidad-unidad, mediante leyes de rozamiento y de resistencia del vínculo a tracción que aproximen el comportamiento real del mortero y de su unión con el bloque o ladrillo (figura 2.37b). En este caso, el tamaño de las unidades normalmente aumenta para mantener la geometría original de la estructura.

Estos dos planteamientos se suelen denominar micro-modelación detallada y micro-modelación simplificada, respectivamente (Lourenço, 1996a); y son particularmente adecuados para describir la respuesta local del material, donde se esperan estados tenso-deformationales marcadamente heterogéneos y la interacción unidad-mortero influye de manera importante en los resultados. Las propiedades elásticas e inelásticas tanto de unidades como mortero pueden ser tomadas en cuenta de manera realista.

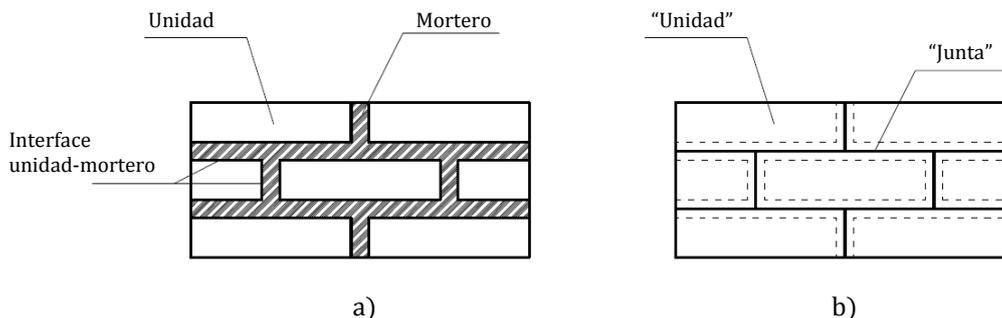


Figura 2.37 - a) Micromodelo detallado; b) Micromodelo simplificado (Lourenço, 1996a)

Uno de los mayores inconvenientes que presentan los micro-modelos es que requieren de una gran cantidad de parámetros de entrada y su obtención suele ser compleja y costosa. Por otro lado, el alto coste computacional que conlleva el cálculo hace que su aplicación no sea práctica en estructuras más complejas, por lo que en general su uso se ve limitado a estudio de pequeños elementos estructurales.

En la micro-modelización simplificada, como ya fue comentado, la obra de fábrica es considerada como un conjunto de bloques elásticos unidos a través de potenciales líneas de fractura o deslizamiento (juntas). Dentro de este planteamiento destaca la formulación propuesta por Lourenço y Rots (1997). Esta formulación, que se basa en conceptos modernos de plasticidad, concentra todo el comportamiento inelástico en los elementos de interface e incluye modos de rotura por tracción y deslizamiento de las juntas y aplastamiento por compresión del material. Este modelo ha sido empleado con resultados satisfactorios en los trabajos de Lobato (2009) y Viviescas (2010), y es el método escogido para realizar las simulaciones del comportamiento al pandeo en paredes de obra de fábrica en la presente investigación.

La utilización de alguna estrategia de micro-modelización en estudios del comportamiento al pandeo de paredes o columnas de obra de fábrica ha sido muy escasa. En la literatura disponible, solo Martini (1997, 1998) ha investigado el comportamiento fuera del plano de paredes de obra de fábrica empleando un enfoque que combinó elementos volumétricos sólidos rectangulares (bloques) con elementos de interface. Un enfoque numérico similar, pero aplicado a pequeños prismas sometidos a carga excéntrica, ha sido utilizado por Adam et al. (2009).

2.7. Discusión

En los últimos años ha habido un cierto aumento del interés en la investigación de las condiciones de estabilidad de paredes de carga de obra de fábrica. Esta investigación ha sido realizada tomando en cuenta elementos bajo distintas configuraciones de carga y apoyo. El conjunto de estas investigaciones ha contribuido al desarrollo de factores de reducción por esbeltez y excentricidad de la carga normalmente empleados en diseño y comprobación de paredes de carga de obra de fábrica.

Desde el punto de vista teórico, varios de los trabajos pioneros desarrollados (Angervo, 1954; Chapman y Slatford, 1957; Kukulski y Lugez, 1966; Haller, 1969; Yokel, 1971) continúan siendo la base de muchos nuevos estudios y enfoques sobre el tema (Schultz et al., 2000; Ganduscio y Romano, 1997; Romano et al., 1993; La Mendola, 1997; De Falco y Lucchesi, 2002; Mura, 2008). Por simplicidad, la mayoría de estas soluciones se ha ocupado de elementos prismáticos con sección rectangular y han asumido que la obra de fábrica no tiene resistencia a tracción.

Gran parte de los trabajos revisados en el apartado 2.3 han empleado diversas relaciones para el comportamiento tensión-deformación en compresión del material. Por ejemplo, Yokel (1971) y Schultz et al. (2000) emplearon una relación elástico-lineal, Ganduscio y Romano (1997) una ley elástica no-lineal. Sin embargo, pocas investigaciones han considerado la resistencia a tracción del material, así como una ley no-lineal entre tensión y deformación bajo compresión. Las aportaciones de Frish-Fay (1980) y Kukulski y Lugez (1966) han sido de los pocos trabajos analíticos que ha considerado la resistencia a tracción del material.

Casi la totalidad de las soluciones analíticas han sido obtenidas para condiciones particulares de carga y apoyo. Un caso que ha recibido especial atención ha sido el estudio de la estabilidad de elementos en cantiléver sometido a distintas condiciones de carga. En particular, bajo carga excéntrica en el extremo libre, bajo su peso propio y más recientemente, unos pocos trabajos se han dirigido al estudio de la estabilidad bajo carga vertical y lateral simultánea. Entre éstos últimos, destacan los trabajos de Schultz et al. (2000) y Bean et al (2008).

De esta manera, los estudios analíticos sobre paredes de obra de fábrica han dado origen a varias formulaciones para estimar la carga crítica de pandeo. Sin embargo, ha quedado en evidencia la dificultad para incorporar leyes constitutivas no-lineales y la resistencia a tracción en dichas formulaciones.

A su vez, varios métodos normativos, entre ellos Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005), están basados en alguna de estas formulaciones, por lo que tampoco representan de manera rigurosa el comportamiento real del material.

En este sentido, la aplicación de métodos computaciones avanzados al estudio del comportamiento al pandeo de paredes de obra de fábrica ofrece varias ventajas. Sin embargo, ha sido escasamente explorada, como ha reflejado la investigación documental. Este enfoque permitiría superar varios inconvenientes relacionados principalmente con la inclusión de la no-linealidad material y geométrica, y de incorporar en los análisis la resistencia a tracción del material.

El uso de métodos computacionales avanzados también permitiría investigar distintas condiciones de apoyo, diferentes formas transversales (secciones regulares o irregulares) o incluso, elementos no-prismáticos (más usuales de encontrar en construcciones históricas).

El método de los elementos finitos ofrece amplia variedad de posibilidades para describir el comportamiento de la obra de fábrica. Dos enfoques destacan de forma particular: macro y micro-modelización. La utilización de uno u otro enfoque depende principalmente del tipo de elemento o estructura bajo estudio y del nivel de la respuesta deseada (en términos de precisión y eficiencia).

En el comportamiento al pandeo de paredes de obra de fábrica, la fisuración a tracción y los grandes desplazamientos son aspectos claves para describir correctamente el comportamiento observado experimentalmente. De este punto de vista, la micro-modelización parece ser la estrategia numérica más adecuada para estudiar este comportamiento. Un trabajo pionero en este sentido fue desarrollado por Martini (1997, 1998), quien empleó fisuración discreta en un modelo bloque-interface tridimensional. Una investigación similar, pero que mezcla diferencias finitas y elementos finitos, fue desarrollado por Payne et al. (1990). Más recientemente, Lu (2003) ha desarrollado un macro-modelo basado en el MEF para desarrollar fórmulas simples de diseño con resultados satisfactorios. Sin embargo, a pesar del avance en las técnicas de modelización numérica, una de las mayores dificultades que ofrece la comprobación de modelos reside en la escasez de referencias experimentales, aunque existen algunos resultados disponibles, como fue resumido en el apartado 2.5.

3

Campaña experimental

3.1. Introducción

Una proporción significativa de la experimentación sobre obra de fábrica se ha llevado a cabo empleando modelos a escala reducida. Este enfoque ha sido utilizado para estudiar diversas características de la fábrica, tanto en pequeños ensamblajes como en complejas configuraciones estructurales. Sus principales ventajas están relacionadas con la reducción de costos y con la posibilidad de reproducir prototipos cuya ejecución en condiciones reales (escala 1:1) podría verse condicionada por ciertas limitaciones. Por lo general, estas limitaciones están relacionadas con espacio en laboratorios o con la disponibilidad de equipamiento apropiado para llevar a cabo los experimentos. Dentro de las investigaciones que han empleado modelos a escala pueden señalarse los trabajos reportados por Sinha et al. (1971), Samarashinghe y Hendry (1982), Mann y Müller (1982), Page (1983) y Tomažević (1987), entre muchos otros. Empleando un enfoque similar, la presente investigación también recurre al uso de modelos a escala reducida.

En trabajos experimentales previos (Lobato, 2009; Charry, 2010) llevados a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) se ha probado, de manera satisfactoria, la viabilidad de trabajar en base a modelos de elementos de obra de fábrica a escala reducida, y en particular, a escala 1:4. Estos trabajos previos han aportado conocimiento experimental relacionado principalmente con el comportamiento de paredes sujetas a estados de tensión biaxial

(formas de rotura exclusivamente en el plano). Sus resultados han sido satisfactorios y, por tanto, permiten plantear la presente campaña experimental en base a modelos de paredes a escala 1:4 mediante ladrillos y micro-morteros especialmente diseñados y fabricados al efecto. Conviene notar que en la presente campaña, tanto ladrillos como micro-morteros han sido elaborados de acuerdo con el protocolo de fabricación desarrollado por Charry (2010).

El propósito principal de la presente experimentación es caracterizar el comportamiento frente al pandeo de paredes de obra de fábrica bajo distintas condiciones de esbeltez y excentricidad de la carga. Por tanto, se trata de una investigación experimental que explora el comportamiento fuera del plano de paredes empleando modelos reducidos. En este sentido, la revisión del estado del conocimiento permitió constatar la escasez de trabajos experimentales dirigidos al estudio de este comportamiento. No obstante, esta escasa evidencia experimental ha sido de valiosa utilidad para el diseño y puesta a punto de la campaña experimental aquí presentada.

Dado el planteamiento metodológico seguido en la presente tesis, en los siguientes apartados se dedica especial atención a la obtención de parámetros necesarios para la calibración y puesta a punto de una aproximación numérica basada en los elementos finitos. Por este motivo, se establece llevar a cabo una serie de ensayos normativos de caracterización de materiales componentes y de propiedades medias de la fábrica. En particular, ensayos sobre micro-mortero y ladrillo, y ensayos a compresión y tracción directa de ensamblajes elementales de obra de fábrica.

3.1.1. Objetivos

El principal objetivo de este capítulo es complementar y expandir la experimentación en obra de fábrica a través de nueva evidencia experimental. En particular, caracterizar experimentalmente el comportamiento de paredes de obra de fábrica ante fenómenos de inestabilidad geométrica (pandeo) sujetas a carga vertical centrada y excéntrica.

En base a ello, los objetivos específicos del presente capítulo son:

- Diseñar y planificar una campaña experimental orientada a caracterizar el posible fallo por pandeo en el sentido perpendicular al plano, utilizando para ello modelos de paredes simples a escala reducida 1:4.
- Caracterizar, según normativa vigente, materiales componentes y propiedades medias de la fábrica a partir de ensamblajes simples.
- Caracterizar el comportamiento frente al pandeo de paredes simples de obra de fábrica a través de la obtención de sus modos de rotura y curvas experimentales tensión vs desplazamiento vertical y tensión vs deflexión lateral.
- Realizar una comparación cualitativa y cuantitativa de los resultados experimentales obtenidos frente a resultados experimentales previos llevados a cabo por otros autores.
- Realizar una breve discusión acerca de las técnicas de ensayo empleadas así como también de los resultados obtenidos.

3.1.2. Organización del estudio

Inicialmente, el apartado 3.2 trata sobre la caracterización de unidades y micro-mortero empleados en la construcción de las paredes. En este apartado también se definen las principales propiedades del material compuesto. Una vez concluida la caracterización de los materiales, se procede a describir la configuración de los ensayos experimentales, la cual se presenta en el apartado 3.3.

Los resultados experimentales obtenidos se presentan en el apartado 3.4. En este punto, se ilustran gráficas experimentales tensión-desplazamiento vertical y tensión-deflexión lateral. Además, se entrega una serie de imágenes y secuencias con los modos de rotura obtenidos durante la campaña experimental.

El apartado 3.5 presenta una comparación de los resultados experimentales obtenidos y otros disponibles en la literatura con las predicciones calculadas mediante Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005).

Por último, en el apartado 3.6, se realiza una breve discusión acerca de los resultados experimentales obtenidos. En esta discusión también se comentan aspectos relacionados con las técnicas experimentales empleadas y se extraen conclusiones acerca del comportamiento observado.

3.2. Caracterización de los materiales

El método empleado para la fabricación de piezas y micro-mortero está basado directamente en los trabajos experimentales realizados por Lobato (2009) y Charry (2010). En la tesis doctoral de este último autor se entrega amplia información relacionada con la producción de ladrillos y micro-mortero a escala 1:4. Asimismo, puede revisarse un completo análisis acerca de los criterios de semejanza que se deben tomar en consideración al momento de utilizar modelos a escala reducida.

Cabe señalar además, que las piezas empleadas en la presente campaña experimental, así como en los trabajos de Lobato (2009) y Charry (2010), han sido manufacturadas por la misma empresa fabricante, por lo que cumplen similares protocolos de fabricación y composición química.

3.2.1. Piezas

Los ladrillos a escala reducida empleados son piezas macizas de arcilla cuyas dimensiones promedio son las siguientes: 72.5 mm de soga, 35 mm de tizón y 12.5 mm de grueso (figura 3.1). Estas dimensiones corresponderían, en escala real, a una unidad de 29x14x5 cms.

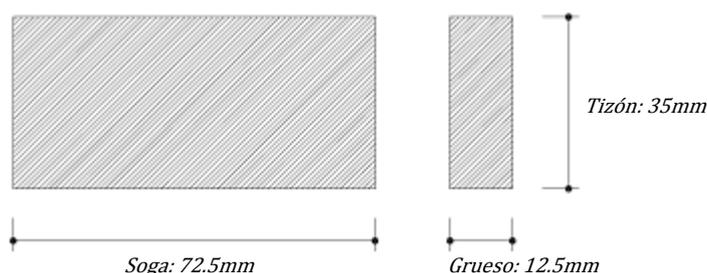


Figura 3.1 – Dimensiones de las piezas a escala 1:4

La resistencia a compresión de las piezas fue obtenida de acuerdo con la norma EN 772-1:2002 (2002). Para tal efecto, 10 piezas fueron escogidas aleatoriamente y ensayadas hasta rotura (figura 3.2a). La resistencia a compresión promedio obtenida para las unidades fue de $f_b = 54.4 \text{ N/mm}^2$.

Sin embargo, de acuerdo con el trabajo experimental de Charry (2010), esta resistencia a compresión está afectada por un factor de escala equivalente a $\delta=0.6$. Por esta razón, la resistencia a compresión normalizada, considerando el factor de escala, es de $f_b = 32.6 \text{ N/mm}^2$. La tabla 3.1 resume los resultados obtenidos.

Del mismo modo se llevaron a cabo 10 ensayos a tres puntos, como se observa en la figura 3.2b, para obtener la resistencia a flexo-tracción de las unidades f_{xb} . A partir de estos resultados se obtuvo, de manera indirecta, la resistencia a tracción f_{tb} . Para ello se empleó la ecuación 3.1 propuesta originalmente para determinar la resistencia a tracción en probetas de hormigón (EHE-08, 2008). En esta expresión h es el canto o altura de la pieza. La tabla 3.2 resume los resultados. El valor promedio de f_{tb} obtenido fue similar al obtenido por Charry (2010).

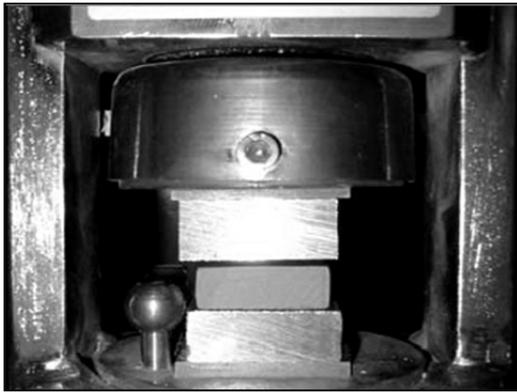
$$f_{tb} = f_{xb} \left[\frac{1.5 \left(\frac{h}{100} \right)^{0.7}}{1 + 1.5 \left(\frac{h}{100} \right)^{0.7}} \right] \quad [3.1]$$

Tabla 3.1 – Piezas - Resistencia a compresión

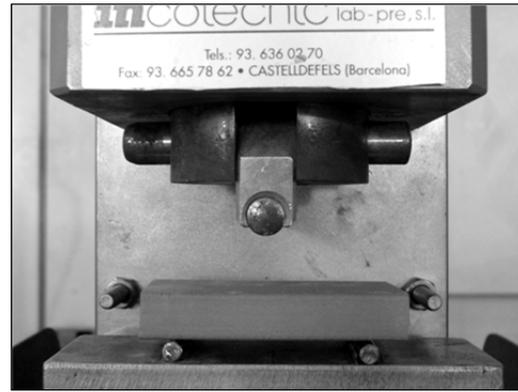
Nº	$F_{\text{máx}}$	f_b	Nº	$F_{\text{máx}}$	f_b
Muestra	(kN)	(N/mm ²)	Muestra	(kN)	(N/mm ²)
1	66.53	52.80	6	69.03	54.79
2	71.25	56.55	7	63.45	50.36
3	68.73	54.55	8	70.25	55.75
4	60.22	47.79	9	69.22	54.93
5	80.60	63.97	10	66.32	52.63
			Prom		54.4
			Factor		0.6
			f_b (N/mm²)		32.6

Tabla 3.2 – Piezas - Resistencia a flexo-tracción

Nº	$F_{\text{máx}}$	f_{xt}	Nº	$F_{\text{máx}}$	f_{xt}
Muestra	(kN)	(N/mm ²)	Muestra	(kN)	(N/mm ²)
1	0.97	14.33	6	1.21	17.87
2	1.03	15.27	7	0.95	14.03
3	0.98	14.47	8	1.11	16.39
4	0.89	13.14	9	1.18	17.43
5	0.96	14.18	10	0.94	13.93
			Prom		15.1
			f_{tb} (N/mm²)		3.92



a)



b)

Figura 3.2 – Ensayos sobre piezas: a) a compresión; b) a flexo-tracción.

Otro ensayo llevado a cabo sobre las piezas fue la prueba de determinación de absorción de agua. La capacidad de absorción por parte de las piezas afecta la resistencia de la fábrica, dado que si su porcentaje es elevado, las piezas absorben parte del agua del mortero fresco debilitando la adherencia en la interface pieza-mortero.

La capacidad de absorción de agua se determinó de acuerdo a la norma EN 772-11 (2001). El ensayo se llevó a cabo sobre 13 piezas. El proceso de ensayo consistió en que las piezas fueron secadas en estufa a una temperatura constante de 105 °C, hasta que la pérdida de masa entre dos procesos de secado sucesivos efectuados en 24 horas de intervalo no superó el 0.1% de la masa total, momento en que se considera que se ha alcanzado la masa constante. A continuación se dejaron enfriar a temperatura ambiente y fueron determinadas su masa y sus dimensiones en estado seco.

Luego se sumergieron en un recipiente con agua, apoyadas en un soporte a fin de evitar que estuvieran en contacto con el fondo de dicho recipiente. En este proceso es importante mantener el nivel de agua constante durante todo el ensayo, añadiendo agua en caso de ser necesario. Después del tiempo de inmersión se retiraron las piezas, se escurrió el agua de la superficie de las mismas y se determinó su masa. La tasa inicial de absorción de cada pieza cerámica se obtiene mediante la ecuación:

$$C_{wi,s} = \frac{m_{so,s} \cdot m_{sec,s}}{A_s \cdot t} \cdot 10^3 \quad [3.2]$$

donde

$C_{wi,s}$ es la tasa inicial de absorción de agua de las piezas de arcilla cocida en $\frac{kg}{m^2 \cdot min}$

$m_{so,s}$ es la masa de la pieza después de la inmersión durante un tiempo t, en gramos;

$m_{sec,s}$ es la masa de la pieza tras el proceso de secado, en gramos;

A_s es la superficie bruta de la cara de la pieza sumergida, en mm²;

t es el tiempo de inmersión, igual a un minuto.

Los resultados obtenidos para este ensayo se encuentran en la tabla 3.3. Como se puede observar, se obtuvo un valor promedio de absorción de un 17.9%. Este valor resulta excesivo, pudiendo provocar la absorción de parte del agua del mortero fresco por parte de las piezas produciendo una disminución de la resistencia de la fábrica.

A fin de reducir este efecto se hizo necesario llevar a cabo un proceso de acondicionamiento de las piezas previo al vaciado del mortero en las diversas configuraciones (simples ensamblajes o paredes). Este acondicionamiento consideró la inmersión de las piezas en agua durante 2 horas y su posterior secado al aire durante 30 minutos. A través de este proceso se logró reducir la absorción de las piezas hasta aproximadamente un 11%.

Además, con los datos obtenidos en este ensayo pudo determinarse la densidad de las piezas, obteniendo un valor promedio de 1717 kg/m³.

Tabla 3.3 – Resultados prueba de absorción

Pieza Nº	Peso Original Ambiente (kg)	Medidas Ambiente (cm)			Peso Seco (kg)	Peso Húmedo (kg)	Absorción %
		Alto	Tizón	Soga			
1	0,0525	1,25	3,43	7,16	0,0525	0,0625	19,05%
2	0,0525	1,26	3,42	7,14	0,0525	0,0620	18,10%
3	0,0530	1,26	3,41	7,13	0,0525	0,0620	18,10%
4	0,0525	1,25	3,41	7,15	0,0520	0,0615	18,27%
5	0,0540	1,26	3,44	7,20	0,0535	0,0630	17,76%
6	0,0535	1,26	3,41	7,24	0,0535	0,0630	17,76%
7	0,0525	1,25	3,42	7,14	0,0530	0,0615	16,04%
8	0,0530	1,25	3,41	7,14	0,0525	0,0615	17,14%
9	0,0530	1,25	3,40	7,17	0,0530	0,0620	16,98%
10	0,0540	1,27	3,45	7,20	0,0540	0,0640	18,52%
11	0,0525	1,25	3,42	7,14	0,0520	0,0620	19,23%
12	0,0530	1,25	3,41	7,15	0,0525	0,0620	18,10%
13	0,0520	1,25	3,40	7,14	0,0520	0,0610	17,31%
Prom.	0,0529	1-255	34-177	71-615	0,0527	0,0622	17,87%

3.2.2. Micro-mortero

El micro-mortero empleado en la fabricación de paredes y probetas fue obtenido a partir de un mortero pre-mezclado tipo M7.5, comercializado como mortero para mampostería donde se requiere una resistencia a compresión mayor o igual a 7.5 N/mm².

Debido a que el espesor de las juntas de mortero en los modelos a escala 1:4 es de aproximadamente 2.5 mm., el mortero pre-mezclado fue cribado para limitar el tamaño máximo del agregado a partículas no mayores a 1.0 mm. Con ello se garantizó la penetración del árido del mortero dentro de las juntas.

Adicionalmente, para garantizar la trabajabilidad del micro-mortero se añadió un aditivo súper-plastificante de amplio uso en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras. La dosificación utilizada fue determinada mediante ensayos en mesa de sacudidas para garantizar una consistencia *fluida*. La dosificación finalmente empleada fue de 1.5% del peso del material ligante. Todas las amasadas de micro-mortero para estas pruebas fueron realizadas en una amasadora para pastas y mortero con capacidad para 5 lts.

Los ensayos realizados sobre probetas de micro-mortero endurecido fueron para caracterizar su resistencia a compresión y a flexo-tracción. Dichos ensayos se llevaron a cabo a una edad de 28 días. Muestras prismáticas de 160x40x40 mm³ fueron ensayadas a tres puntos para obtener la resistencia a flexo-tracción (figura 3.3b) de acuerdo con la norma EN 1015-11 (2000). A continuación, utilizando las dos mitades resultantes del ensayo de resistencia a flexo-tracción se realizaron los ensayos a compresión (figura 3.3a).

La tabla 3.4 resume los resultados obtenidos. La resistencia a compresión promedio obtenida del mortero ($f_m = 7.3 \text{ N/mm}^2$) es bastante similar al valor obtenido por Lobato (2009) y ligeramente inferior a los valores obtenidos por Charry (2010).

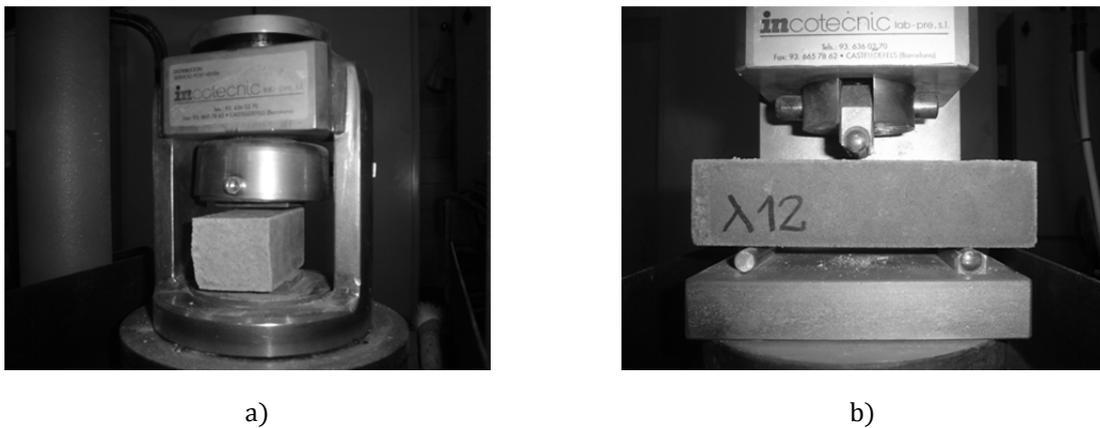


Figura 3.3 – Ensayos sobre probetas de micro-mortero endurecido: a) a compresión; b) a flexo-tracción.

Tabla 3.4 – Resultados a flexión y compresión para el micro-mortero endurecido

Probeta	Edad (días)		Carga Max. (kN)	f_{x_m} (N/mm ²)	Mitad	Carga Max. (kN)	f_m (N/mm ²)	f_m prom. (N/mm ²)
	Desmolde	Ensayo						
1	2	28	1.15	2.7	A	11.47	7.17	7.1
					B	11.28	7.05	
2	2	28	1.51	3.5	A	12.49	7.81	7.7
					B	12.05	7.53	
3	2	28	1.24	2.9	A	11.08	6.93	7.1
					B	11.57	7.23	
Prom.				3.1		Prom.	7.3	

3.2.3. La obra de fábrica

Con la finalidad de calibrar una aproximación numérica resulta imprescindible llevar a cabo ensayos orientados a caracterizar experimentalmente el comportamiento del material compuesto. En particular, es fundamental conocer la resistencia a compresión y el módulo de deformación secante del material. Además, para esta campaña, es también fundamental obtener la resistencia a tracción de la unión pieza-mortero. Tal y como fue observado en el estado del conocimiento, tales propiedades materiales son esenciales para reproducir correctamente la respuesta mecánica del material frente al pandeo.

3.2.3.1. Resistencia a compresión

Para determinar la resistencia a compresión y el módulo de Young de la fábrica se confeccionaron 5 probetas en acuerdo con la norma EN 1052-1 (1999). Las dimensiones de las probetas se muestran en la figura 3.4. Los ensayos fueron llevados a cabo en una prensa hidráulica con capacidad de 200 kN. La carga fue aplicada uniformemente sobre ambas caras de la probeta y aumentó progresivamente de forma que se alcanzó la rotura tras 15 a 30 min desde el comienzo del ensayo.

Las probetas fueron construidas siguiendo el mismo procedimiento constructivo adoptado para las paredes (descrito en el apartado 3.3). Como medida para evitar la desecación de las probetas durante los tres primeros días tras la construcción se cubrieron con láminas de polietileno, tras lo cual se dejaron descubiertas en ambiente de laboratorio hasta su ensayo a los 28 días.

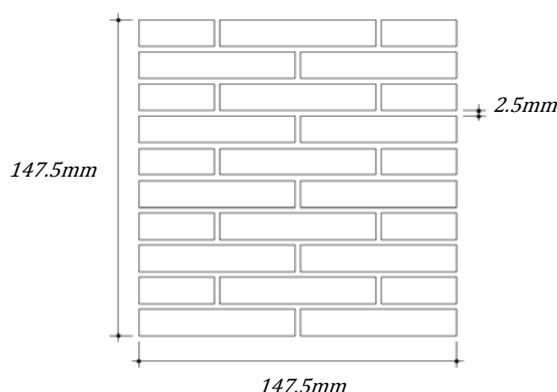


Figura 3.4 – Geometría para ensayos a compresión uniaxial

El ensayo consistió en aplicar una deformación de compresión perpendicular a los tendeles hasta producir la rotura de las probetas. Para determinar el módulo de elasticidad E , se acoplaron dispositivos de medida (LVDT) para medir el acortamiento de las probetas durante el proceso de carga. De acuerdo con la norma EN 1052-1 (1999), el cálculo de E se determinó como el módulo secante de la media del conjunto de las deformaciones unitarias ε bajo tensión igual a un tercio de la tensión máxima registrada. De este modo, la resistencia uniaxial a compresión media de la obra de fábrica fue de $f_c = 14.2 \text{ N/mm}^2$ y el módulo de elasticidad obtenido fue igual a $E = 3458 \text{ N/mm}^2$. La tabla 3.5 resume los resultados obtenidos.

Tabla 3.5 – Resistencia a compresión uniaxial y módulo de Young de la fábrica

Probeta Nº	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	f_c (N/mm ²)	ε (mm/mm)	E (N/mm ²)
1	74.42	14.4	0.001461	3277.8
2	69.68	13.5	0.001268	3536.2
3	68.35	13.2	0.000937	4694.1
4	76.97	14.9	0.001697	2918.7
5	79.65	15.4	0.001790	2863.4
Prom.	73.8	14.2	0.001431	3458.0

Los valores de resistencia a compresión y de módulo de Young obtenidos son ligeramente inferiores a los reportados por Lobato (2009) y Charry (2010). La causa principal sería la menor resistencia a compresión que mostraron las piezas con respecto a los dos trabajos previos (aproximadamente un 28% inferior). Sin embargo, aunque la resistencia a compresión de las unidades fue menor, las probetas elaboradas en la presente campaña desarrollaron un módulo de elasticidad igual a 244 veces la resistencia a compresión. Este valor es similar a los valores reportados por Lobato (2009) y Charry (2010), quienes también llevaron a cabo experimentos a escala 1:4.

La tabla 3.6 resume varias relaciones experimentales para E/f_c . Como se observa, el resultado obtenido en la presente campaña, en términos de E/f_c , presenta una tendencia similar a varios trabajos experimentales previos sobre paredes simples y que también presentan relaciones de E/f_c muy inferiores a la razón propuesta por la normativa vigente (CTE-DB-SE:F, 2007; EN 1996-1-1:2005).

Tabla 3.6 – Relaciones experimentales para E/f_c

Campaña	f_c (N/mm ²)	E (N/mm ²)	E/f_c (-)
Presente investigación	14.2	3458	244
Lobato (2009)	18.5	4260	230
Charry (2010)	17.5	5006	285
Hasan y Hendry (1976)	17.3	6530	377
Watstein y Allen (1970)	39.2	21160	540
Kirtschig y Anstötz (1991)	12.2	8535	700

La figura 3.5a muestra una probeta lista para ensayo y la figura 3.5b una imagen con el modo de fallo típico presentado durante los ensayos. El modo general de rotura presentó, en una primera etapa, el desarrollo de dos finas fisuras verticales que atravesaron tanto unidades como mortero. Estas fisuras se ubicaron aproximadamente a 1/3 del ancho de las probetas y aparecieron para una tensión aproximada del 50-70% de la tensión máxima. Luego, con el aumento gradual de la carga incrementó el ancho de las fisuras y, al mismo tiempo, se comenzó a producir aplastamiento de material en las dos o tres primeras hiladas de la probeta (parte superior e inferior). Este proceso llevó finalmente al colapso total de las probetas. Además, en varios casos, se apreció la aparición de una fisura vertical situada en el espesor de la probeta.

Como ha sido bien documentado en la literatura, las fisuras verticales que atraviesan unidades y mortero aparecen producto del estado de tensiones internas de compresión y tracción, cuyo origen se encuentra en la distinta deformabilidad que presentan unidades y mortero.



a)



b)

Figura 3.5 – Compresión uniaxial simple: a) configuración ensayo; b) modo de rotura típico

3.2.3.2. Resistencia a tracción

El comportamiento a tracción ha sido pocas veces reportado en estudios experimentales, debido principalmente a que no existe normativa que regule los ensayos y a la falta de equipamiento adecuado para su ejecución. Van der Pluijm (1997; 1999) ha sido uno de los autores que más ha investigado el comportamiento de la obra de fábrica bajo tracción. Los ensayos llevados a cabo en la presente campaña están basados en los procedimientos reportados por este autor.

Para llevar a cabo los ensayos se empleó la prensa servo-hidráulica axial con capacidad para ± 500 kN (figura 3.6). Esta máquina de ensayo dispone de mordazas hidráulicas para adaptar ensayos a tracción empleando platos horizontales.

Debido a que la capacidad de carga de este módulo era demasiado elevada para los requerimientos del ensayo, hubo que adaptar al equipo una célula de carga con una capacidad de 5 kN. Este dispositivo permitió un control por desplazamiento acorde a las características del ensayo. La adaptación consideró una unión articulada en la parte superior del esquema para evitar el giro de los platos entre los que se encontraba adherida la probeta. La muestra consideró dos piezas de ladrillo unidas mediante una única junta de mortero. Las dimensiones de las probetas y el esquema de ensayo se pueden observar en la figura 3.7. Los ensayos fueron realizados a una edad de 28 días y bajo una velocidad de deformación de 0.005 mm/min. Los desplazamientos fueron medidos a través del transductor diferencial interno de la célula de carga.

La resistencia a tracción se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$f_t = \frac{F_{max}}{A} \quad [3.3]$$

donde F_{max} corresponde a la carga máxima de tracción y A al área de la sección transversal de la probeta.



Figura 3.6 – Equipamiento para ensayo a tracción directa

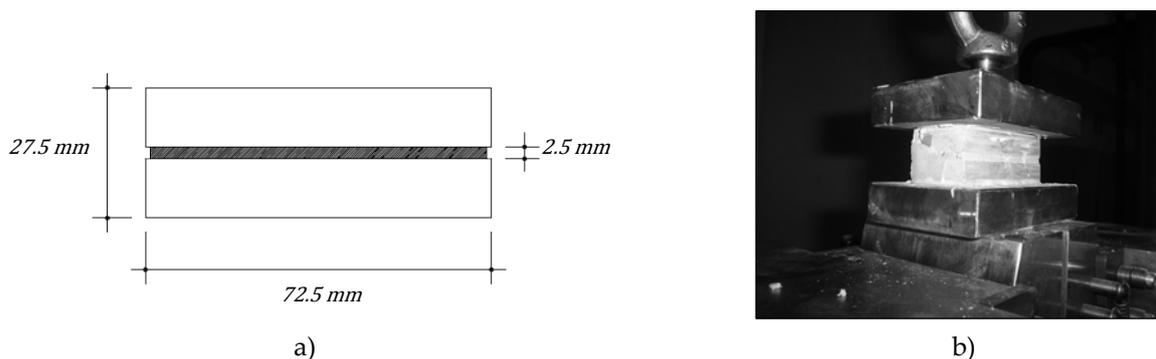


Figura 3.7 – Ensayo a tracción directa: a) dimensiones de la probeta; b) esquema de ensayo

Si el ensayo a tracción es controlado más allá de la carga máxima (comportamiento post-pico) es posible obtener la energía de fractura en modo I asociada. Este parámetro inelástico es relevante para las aproximaciones numéricas que se desarrollarán en los siguientes capítulos y es equivalente al área bajo la curva $\sigma - \epsilon$. Lamentablemente, este parámetro es de difícil obtención debido a que la rotura de las probetas es extremadamente frágil y repentina, por lo que en la mayoría de las ocasiones no es posible capturar el comportamiento post-pico. En la presente campaña, solo en dos de los ensayos se pudo captar dicho comportamiento.

Los resultados de los todos ensayos son presentados en la tabla 3.7. El resultado promedio de la resistencia a tracción es de $f_t = 0.55 \text{ N/mm}^2$ y de la energía de fractura en modo I es de $G_f^I = 0.013 \text{ Nmm/mm}^2$. Cabe notar que el valor de resistencia a tracción obtenido representa aproximadamente el 4% de la resistencia a compresión. Este valor es del orden de los valores reportados por Watstein y Allen (1970), Van der Pluijm (1997) y CUR (1997).

Además, luego de cada ensayo se chequeó mediante inspección visual la superficie neta de adherencia de los ensamblajes ensayados. Dos ejemplos son mostrados en la figura 3.8. En muchos casos, principalmente a escala real, la superficie de adherencia está acotada al centro de la probeta y es por lo tanto inferior al área de la sección transversal. Sin embargo, en las paredes elaboradas en la presente campaña la superficie de adherencia es igual a la superficie de la sección transversal, por lo que estos ensayos reproducen satisfactoriamente esta condición.

Tabla 3.7 – Resultados ensayos a tracción directa

Probeta Nº	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	f_t (N/mm^2)	G_f^I (Nmm/mm^2)
1	1621.83	0.66	0.0143
2	1332.90	0.54	-
3	1603.81	0.65	-
4	1047.32	0.42	0.0117
5	1234.22	0.50	-
Prom.		0.55	0.0130

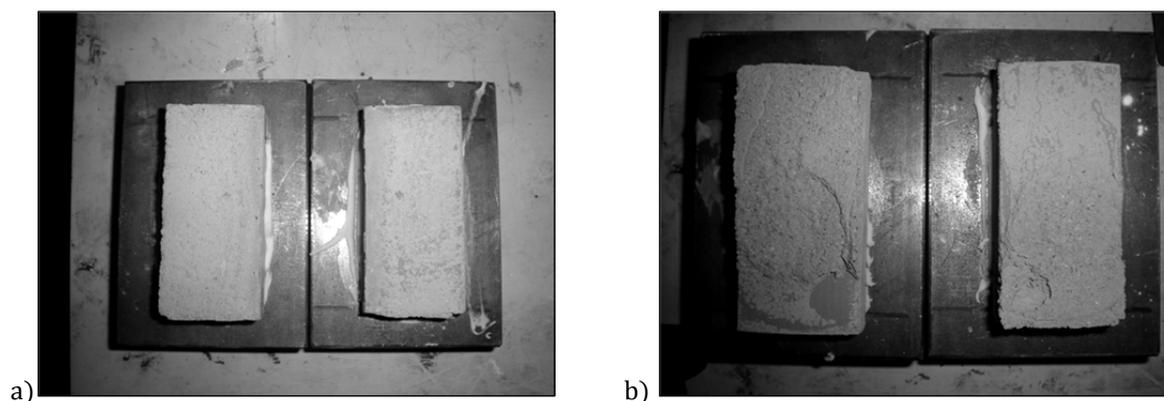


Figura 3.8 – Superficies de adherencia en probetas a tracción

3.3. Procedimiento de ensayo sobre paredes

El presente apartado describe el procedimiento de ensayos sobre paredes de obra de fábrica escala 1:4 llevado a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universitat Politècnica de Catalunya. Tomando como punto de partida trabajos experimentales previos acerca del comportamiento al pandeo de paredes de obra de fábrica (Watstein y Allen, 1970; Hasan y Hendry, 1976; Kirtschig y Anstötz, 1991; entre otros), se ha diseñado una campaña experimental dirigida al estudio de paredes bajo cargas de compresión centrada y excéntrica para diferentes razones de esbeltez.

3.3.1. Descripción del programa

El programa diseñado para esta campaña experimental se muestra en la tabla 3.8. Para cada configuración, el programa contempla el ensayo hasta rotura de tres probetas bajo carga vertical uniformemente distribuida. En total, 36 paredes simples en aparejo trabado fueron construidas y ensayadas satisfactoriamente.

Tabla 3.8 – Programa de ensayos

Pared designación	Esbeltez h/t	Excentricidad e/t
W6-0	6.8	0
W12-0	12.6	0
W18-0	18.7	0
W25-0	25.6	0
W6-1/6	6.8	1/6
W12-1/6	12.6	1/6
W18-1/6	18.7	1/6
W25-1/6	25.6	1/6
W6-1/3	6.8	1/3
W12-1/3	12.6	1/3
W18-1/3	18.7	1/3
W25-1/3	25.6	1/3

Como se puede observar, las excentricidades previstas son $e = 0$, $e = t/6$ y $e = t/3$, donde t es el espesor de la pared. En tanto que las razones de esbeltez previstas son 6.8, 12.6, 18.7 y 25.6. Estas características geométricas de ensayo fueron escogidas para garantizar una amplia caracterización de la respuesta estructural de las paredes frente al pandeo. Cabe señalar además que las características seleccionadas están en acuerdo con los valores establecidos en la normativa vigente. En particular, se han considerado los límites máximos señalados por Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) en relación a la excentricidad máxima de cálculo ($e = t/3$) y máxima razón de esbeltez ($h/t \leq 27$).

La geometría de las paredes y la configuración del ensayo se muestran en la figura 3.9. En los experimentos, ambos extremos se tratan con la voluntad de reproducir una condición de apoyo simple con giro libre. Esta condición de apoyo se logra por medio de bandas de neopreno de 5 mm de espesor. Estos elementos cumplen tres funciones principales:

- distribuir la carga vertical en todo el ancho de la pared;
- determinar la excentricidad de la carga aplicada; y
- permitir la rotación en ambos extremos.

Todas las paredes fueron ensayadas en una prensa servo-hidráulica con actuador de ± 1000 kN bajo control por desplazamiento hasta el colapso. La carga aplicada fue registrada mediante una célula de carga de capacidad ± 200 kN incorporada en la prensa. La velocidad de aplicación de la carga fue modificada en cada ensayo de acuerdo con la esbeltez de la pared y excentricidad de la carga aplicada.

El desplazamiento vertical fue registrado mediante un transductor diferencial interno que posee la propia célula de carga, mientras que las deformaciones laterales fueron registradas mediante transductores de desplazamiento ubicados a $1/4$, $1/2$ y $3/4$ de la altura de cada pared. La figura 3.10 muestra dos vistas generales del ensayo, junto a parte de la instrumentación empleada.

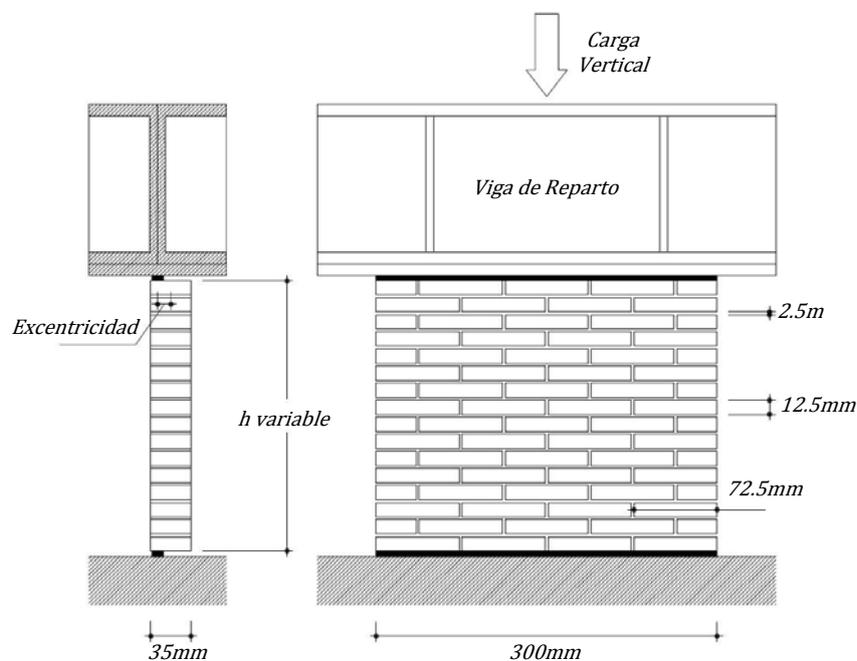


Figura 3.9 – Geometría de las paredes y configuración del ensayo

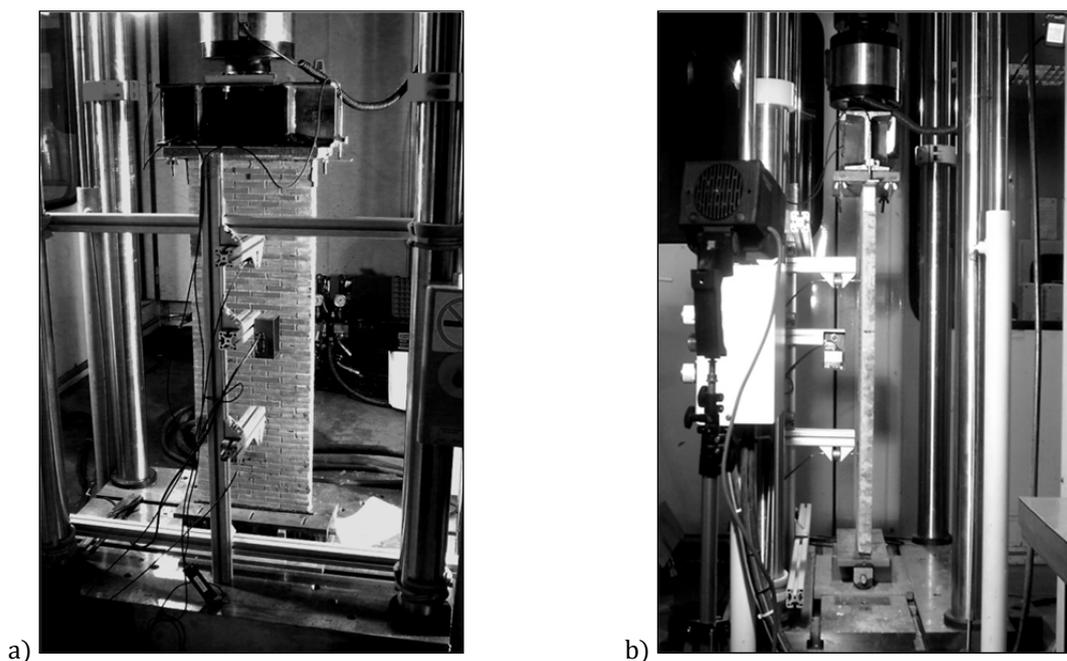


Figura 3.10 – Pared de esbeltez 25.6 lista para ensayar: a) vista frontal, b) vista lateral

3.3.2. Proceso constructivo

Las paredes fueron construidas en aparejo trabado y curadas en ambiente de laboratorio. Para minimizar los efectos de la mano de obra, todas las paredes fueron construidas horizontalmente sobre un encofrado de madera. Page (1983) y Lobato (2009) han reportado un procedimiento constructivo similar con resultados satisfactorios.

Gran parte del procedimiento constructivo empleado en la presente campaña experimental puede observarse en la secuencia de imágenes de la figura 3.11. A continuación se describen brevemente las diversas fases del proceso constructivo de las paredes:

- Primero, la madera de respaldo fue recubierta con papel plastificado, dejando la superficie de papel hacia el exterior. La superficie frontal sobre la que se trabajará no debe quedar adherida a la madera. Luego, sobre el papel fueron trazadas las dimensiones de la pared a construir.
- Para asegurar un espesor de junta constante de 2,5 mm, las piezas fueron pegadas por uno de sus cantos a la superficie de papel. El espesor de la junta fue controlado mediante la colocación temporal entre piezas de una regleta con espesor 2.5 mm (figura 3.11a). El adhesivo empleado fue Loctite 454. Las piezas con defectos visibles fueron rechazadas. Una vez finalizado el pegado de las piezas, las paredes fueron almacenadas a la espera de la colocación del encofrado perimetral para contener el micro-mortero (figura 3.11b).
- El moldaje perimetral fue realizado empleando listones de madera en los laterales y perfiles metálicos en los extremos superior e inferior de la pared. Los perfiles fueron perforados convenientemente para, posterior al vaciado del mortero, aplicar una compresión mediante barras roscadas que simulara el confinamiento que produce el peso propio en el proceso constructivo tradicional (figura 3.11c).



Figura 3.11 – Proceso constructivo de las paredes

- Debido a la alta succión de las piezas, las paredes fueron sumergidas en agua durante 2 horas y escurridas al aire durante 30 min antes de vaciar el mortero fresco. Una vez concluido el proceso anterior, se procedió a verter micro-mortero, previamente fabricado en una amasadora de capacidad 50 lts, dentro de las juntas. El mortero fue correctamente compactado mediante una mesa vibradora (figura 3.11d).
- Después del colado, las paredes fueron cubiertas con una lámina plástica por 24 hrs para evitar su desecación. A las 24 hrs se realizó una cuidadosa limpieza del mortero sobrante en la superficie expuesta y se introdujo la compresión mediante barras roscadas (figura 3.11f). Luego, las paredes fueron curadas y almacenadas al aire por al menos 28 días, hasta el día de su ensayo.

- Finalmente, previo al montaje de las paredes en la prensa, se procedió al desencofrado y a la retirada de la base de madera (que también cumplió la función de facilitar el transporte de las paredes dentro del laboratorio). La eliminación de la base de madera se facilitó gracias al recubrimiento de plástico colocado inicialmente. En algunos casos fue necesario limpiar la pared de restos de papel que quedaron adheridos a las piezas.

3.3.3. Equipos e instrumentación

Los equipos e instrumentación empleados en los ensayos sobre paredes fueron los siguientes:

- Máquina INSTRON de ensayo servo-hidráulica axial con bastidor de 4 columnas y actuador de ± 1000 kN (figura 3.12). El sistema incluye adquisición de datos multicanal para ensayos estáticos y sistema de control de ensayo. La carga vertical aplicada se registró a través de una célula de carga de 200 kN incorporada en la prensa.



Figura 3.12 – Prensa INSTRON

- Cada pared fue instrumentada para registrar la deflexión lateral. Para ello se emplearon 2 transductores de desplazamiento (LVDT's) con rango de lectura de ± 5 mm y un sensor láser con un rango de lectura de 10 mm. En cada experimento, la posición de los LVDT's fue a $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ de la altura y la del sensor a $\frac{1}{2}$ de la altura (figura 3.13).
- Sistema de filmación y análisis de vídeo de alta velocidad (hasta 10.000 imágenes por segundo). El empleo de este equipo fue fundamental para capturar el colapso por pandeo producido en las paredes. El sistema permitió capturar los instantes previos y posteriores al colapso mediante un disparador de secuencia o trigger (figura 3.14).

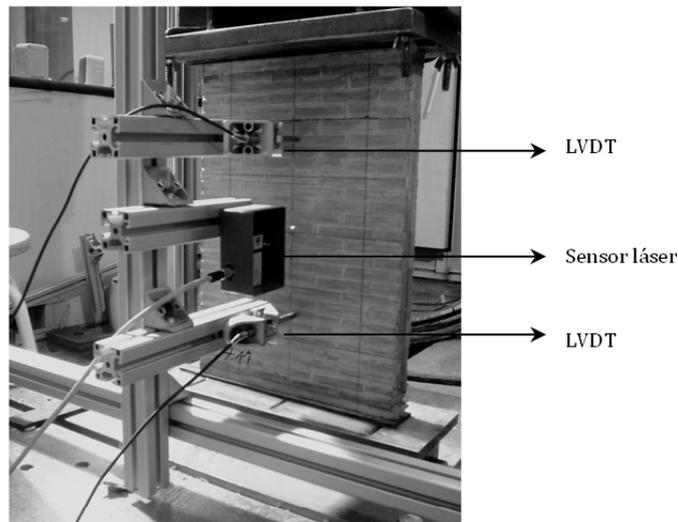


Figura 3.13 - Transductores y sensor láser empleado en los ensayos

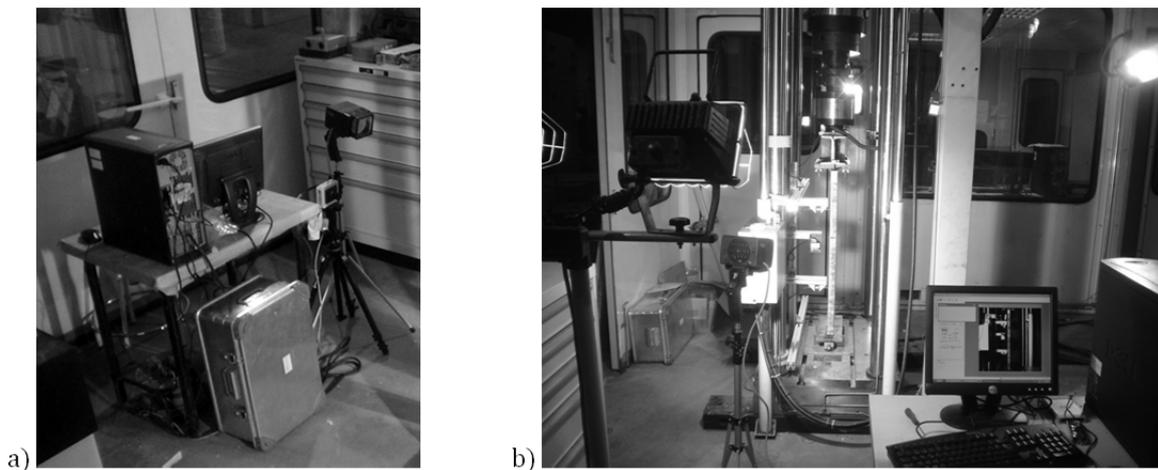


Figura 3.14 - Cámara de alta velocidad: a) equipo; b) vista panorámica

3.4. Resultados experimentales

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, 36 paredes fueron ensayadas satisfactoriamente hasta rotura. En los siguientes apartados se presentan los resultados obtenidos así como también los modos de rotura observados durante los experimentos.

3.4.1. Tensiones de rotura

La tabla 3.9 presenta un resumen de los resultados experimentales obtenidos, incluyendo los valores promedio (\bar{x}) y el coeficiente de variación (CV). Asimismo, estos resultados se presentan gráficamente en la figura 3.15, que también incluye en valor de la resistencia a compresión f_c . Como era esperable, la razón de esbeltez y la excentricidad de la carga tienen un significativo efecto sobre la capacidad resistente de las paredes ensayadas.

Los resultados muestran una importante dispersión. Como fue mencionado anteriormente, esta dispersión también ha sido reportada en campañas previas y se debe principalmente a la dispersión de las propiedades de los propios materiales constituyentes y a las pequeñas excentricidades accidentales introducidas en los ensayos. También se pueden atribuir a errores en la alineación vertical o a pequeñas desviaciones generadas en la etapa de construcción. Estos factores pueden llegar a ser importantes en el caso de paredes esbeltas.

Tabla 3.9 – Resultados experimentales. Tensiones de rotura en N/mm^2

Muro Nº	Razón de Esbeltez h/t	Excentricidad								
		e=0			e=t/6			e=t/3		
		σ	\bar{x}	CV	σ	\bar{x}	CV	σ	\bar{x}	CV
W6-1	6.8	12.3			8.0			3.9		
W6-2	6.8	14.0	12.7	8.6%	8.9	8.5	5.6%	2.9	3.7	19.5%
W6-3	6.8	11.9			8.7			4.3		
W12-1	12.6	10.9			8.0			2.1		
W12-2	12.6	11.6	11.6	6.8%	7.3	7.6	5.0%	2.0	2.2	11.2%
W12-3	12.6	12.5			7.4			2.5		
W18-1	18.7	10.1			4.4			1.5		
W18-2	18.7	9.7	10.4	9.1%	4.8	4.5	5.9%	1.3	1.4	10.5%
W18-3	18.7	11.5			4.3			1.2		
W25-1	25.6	8.9			2.6			1.3		
W25-2	25.6	6.7	7.6	15.1%	3.0	2.8	8.0%	1.1	1.1	13.9%
W25-3	25.6	7.2			2.7			1.0		

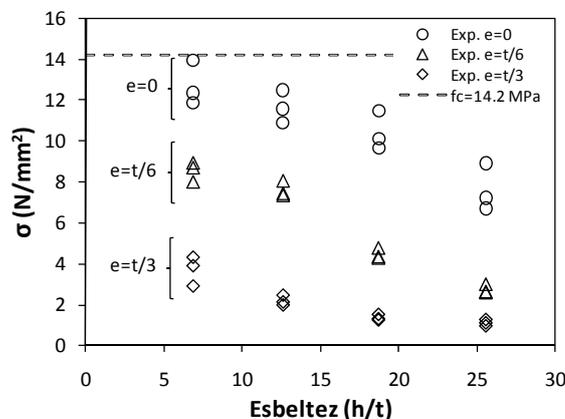


Figura 3.15 – Representación gráfica de los resultados experimentales

Puede observarse que la pérdida de capacidad de carga para una pared de esbeltez 6.8 estuvo entre 25-40% y para una pared de esbeltez 25.6 estuvo entre 55-70%, si la excentricidad de la carga es $t/6$, en comparación con la excentricidad nula. Del mismo modo, la pérdida de capacidad de carga varió entre 60-75% para la esbeltez 6.8 y entre el 80-90% para la esbeltez de 25.6, si la excentricidad es $t/3$ en comparación con la excentricidad nula. Estos resultados confirman que la capacidad resistente de muros de obra de fábrica disminuye drásticamente con la relación de esbeltez y la excentricidad de carga.

Los resultados experimentales obtenidos en la presente campaña junto con los resultados experimentales obtenidos por otros autores (referidos en el capítulo 2) se comparan en la figura 3.16. La comparación se hace en términos de σ/f_c , donde σ es la tensión de rotura y f_c es la resistencia a compresión de la obra de

fábrica reportada en cada campaña. La comparación se realiza sólo entre los resultados con similares condiciones de apoyo (extremo articulado en la parte superior e inferior) y excentricidad de la carga ($e = 0$; $e = t/6$ y $e = t/3$). Aunque, experimentos llevados a cabo bajo condiciones de apoyo diferentes también podrían ser comparados aplicando adecuadamente el concepto de longitud de pandeo.

En la mayor parte de la experimentación ha habido, inevitablemente, diferencias en las condiciones de ensayo y en la interpretación de resultados, como ha quedado reflejado en los diversos métodos para obtener factores de reducción. Sin embargo, a pesar que las campañas emplean diferentes escalas y diferentes materiales constituyentes (por ejemplo, algunos emplean unidades macizas y otros unidades huecas), se observa una tendencia similar entre la tensión a compresión normalizada y la relación de esbeltez para la mayoría de los resultados experimentales considerados. Este hecho podría demostrar que la evaluación resistente de una pared es función de unos pocos parámetros. Sin embargo, el comportamiento también se ve afectado por el módulo elástico del material y por su resistencia a tracción, como será observado en los capítulos siguientes.

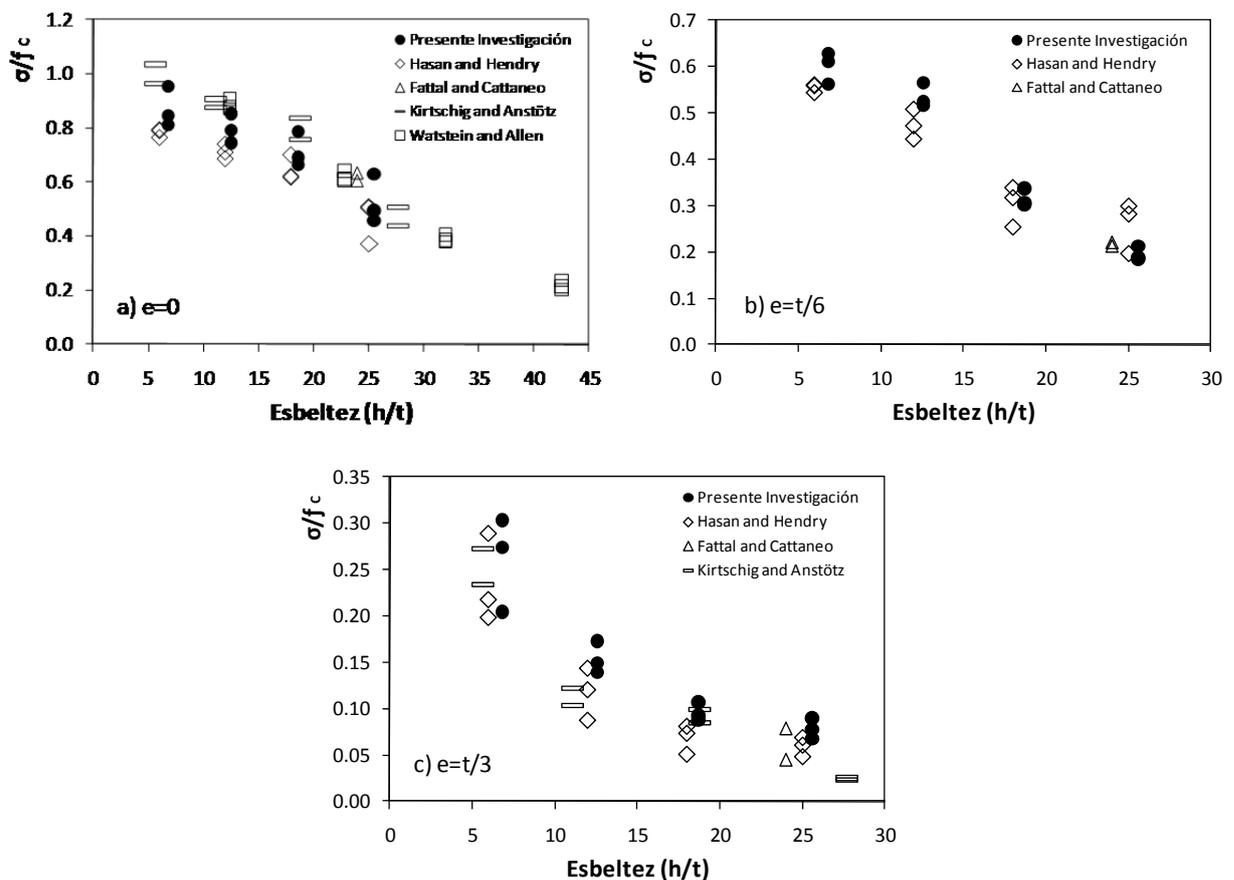


Figura 3. 16 - Relación experimental σ/f_c contra la esbeltez para a) $e = 0$, b) $e = t/6$ y c) $e = t/3$.

3.4.2. Diagramas tensión–desplazamiento y tensión–deflexión lateral

Como ha sido mencionado con anterioridad, los experimentos llevados a cabo en la presente campaña han empleado elementos de neopreno en los extremos. Estos elementos han permitido definir adecuadamente la excentricidad de la carga y al mismo tiempo han permitido la libre rotación de los extremos. Sin embargo, como consecuencia de su utilización, las curvas experimentales tensión–desplazamiento vertical

no representan exclusivamente la deformación producida en las paredes, pues gran parte de la deformación vertical registrada, principalmente al comienzo de cada experimento, corresponde a la deformación exhibida por los mencionados elementos. Por esta razón, se ha querido presentar los resultados, preferentemente y donde ha sido posible, a través de curvas tensión–deflexión lateral. Estas curvas no presentan influencia aparente por parte de los apoyos de neopreno.

A pesar de lo anterior, la presentación de las series de baja esbeltez (es decir, W6 y W12), al no registrar deflexión lateral perceptible, se muestran a través de curvas tensión–deformación vertical. Este comportamiento queda graficado en la figuras 3.17, 3.18 y 3.19. Las gráficas corresponden a la excentricidad nula, $e = t/6$ y $e = t/3$ para las series W6 y W12. En estas gráficas se observa claramente, en el tramo inicial de cada curva, un comportamiento no-lineal de endurecimiento con la tensión típico de elementos de neopreno.

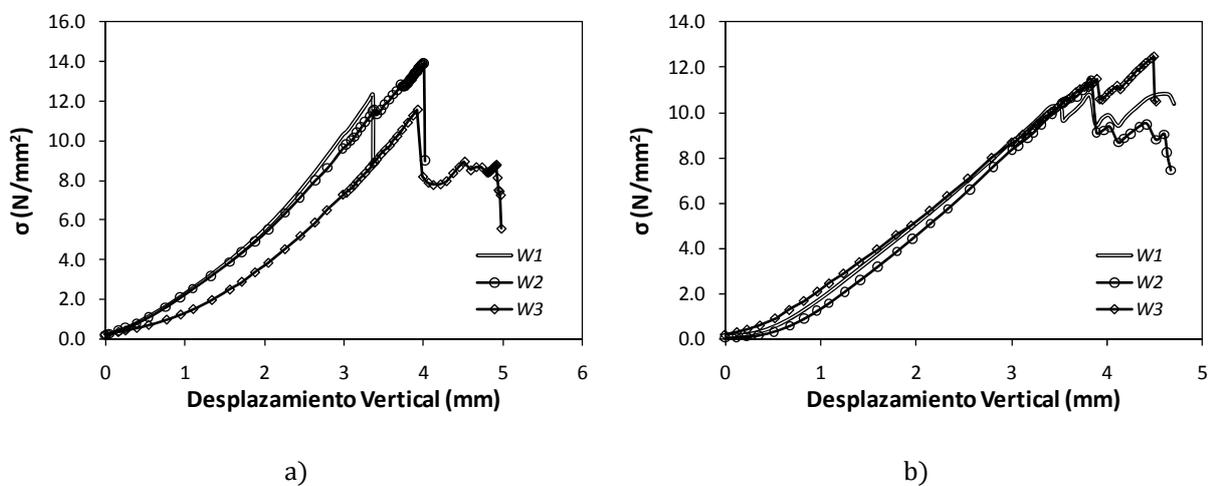


Figura 3.17 - Diagramas tensión–desplazamiento vertical para excentricidad nula: a) serie W6; b) serie W12.

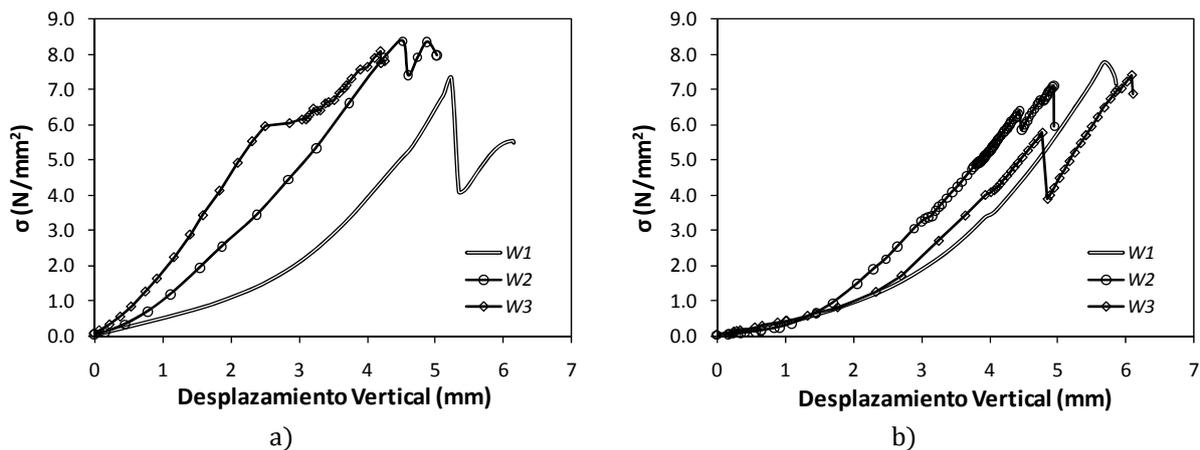


Figura 3.18 - Diagramas tensión–desplazamiento vertical para excentricidad $e = t/6$: a) serie W6; b) serie W12.

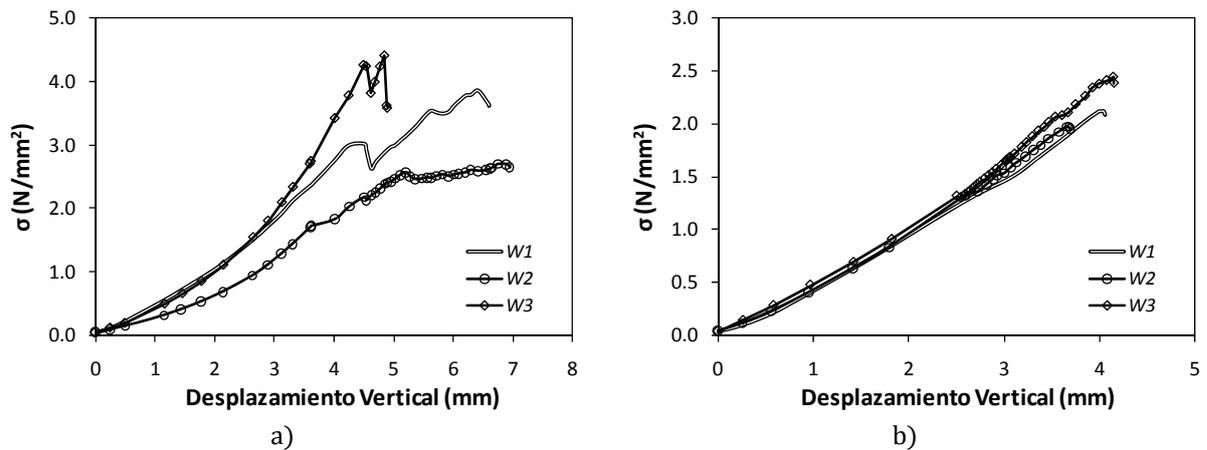


Figura 3.19 - Diagramas tensión–desplazamiento vertical para excentricidad $e = t/3$: a) serie W6; b) serie W12.

Las paredes correspondientes a las series W18 y W25 mostraron considerable deflexión lateral para todas las condiciones de excentricidad de la carga. Para cada uno de los experimentos, la relación entre la deflexión a media altura de la pared y la tensión se muestran en las figuras 3.20 y 3.21, para las series W18 y W25 respectivamente.

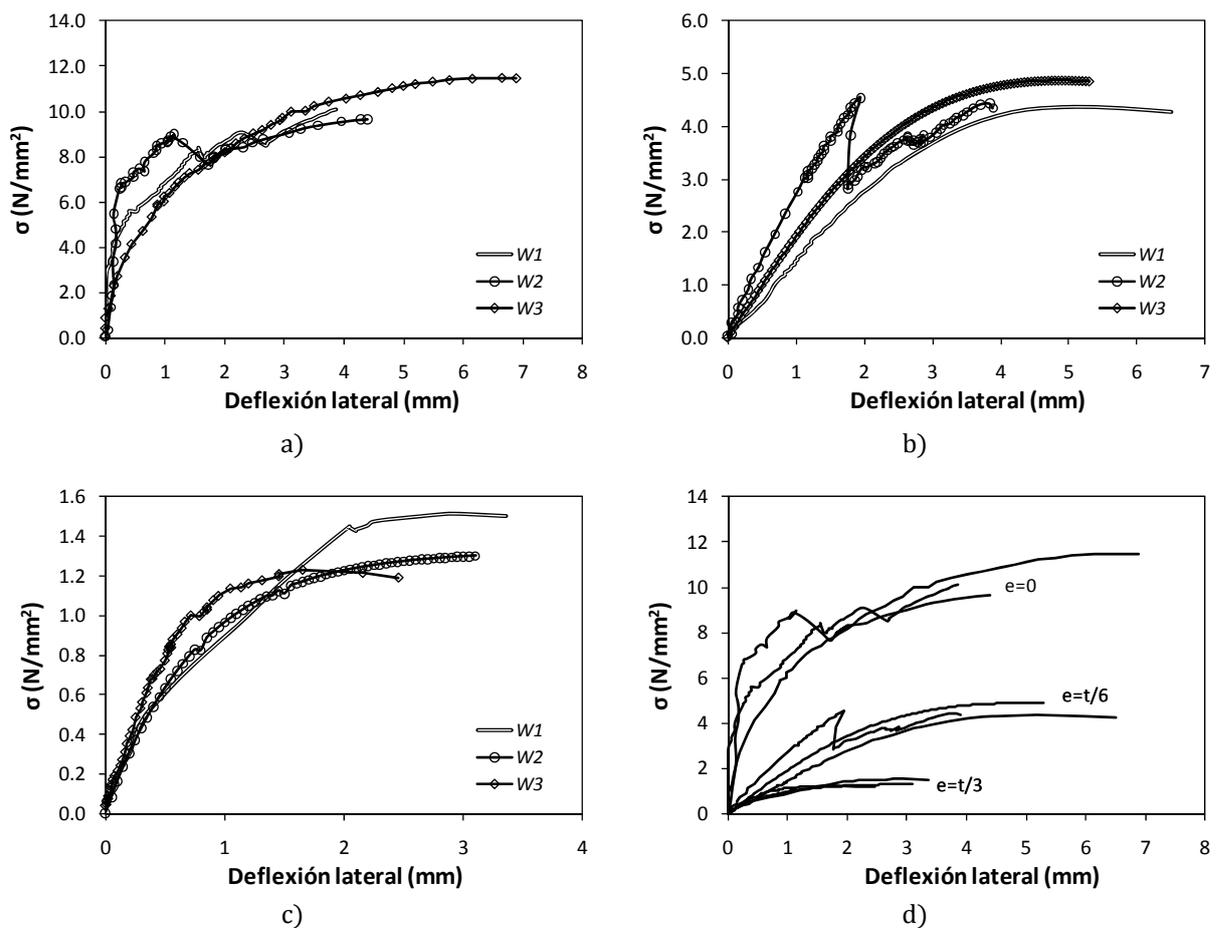


Figura 3.20 - Diagramas tensión - deflexión lateral para la serie W18: a) $e = 0$; b) $e = t/6$; c) $e = t/3$; d) agrupadas.

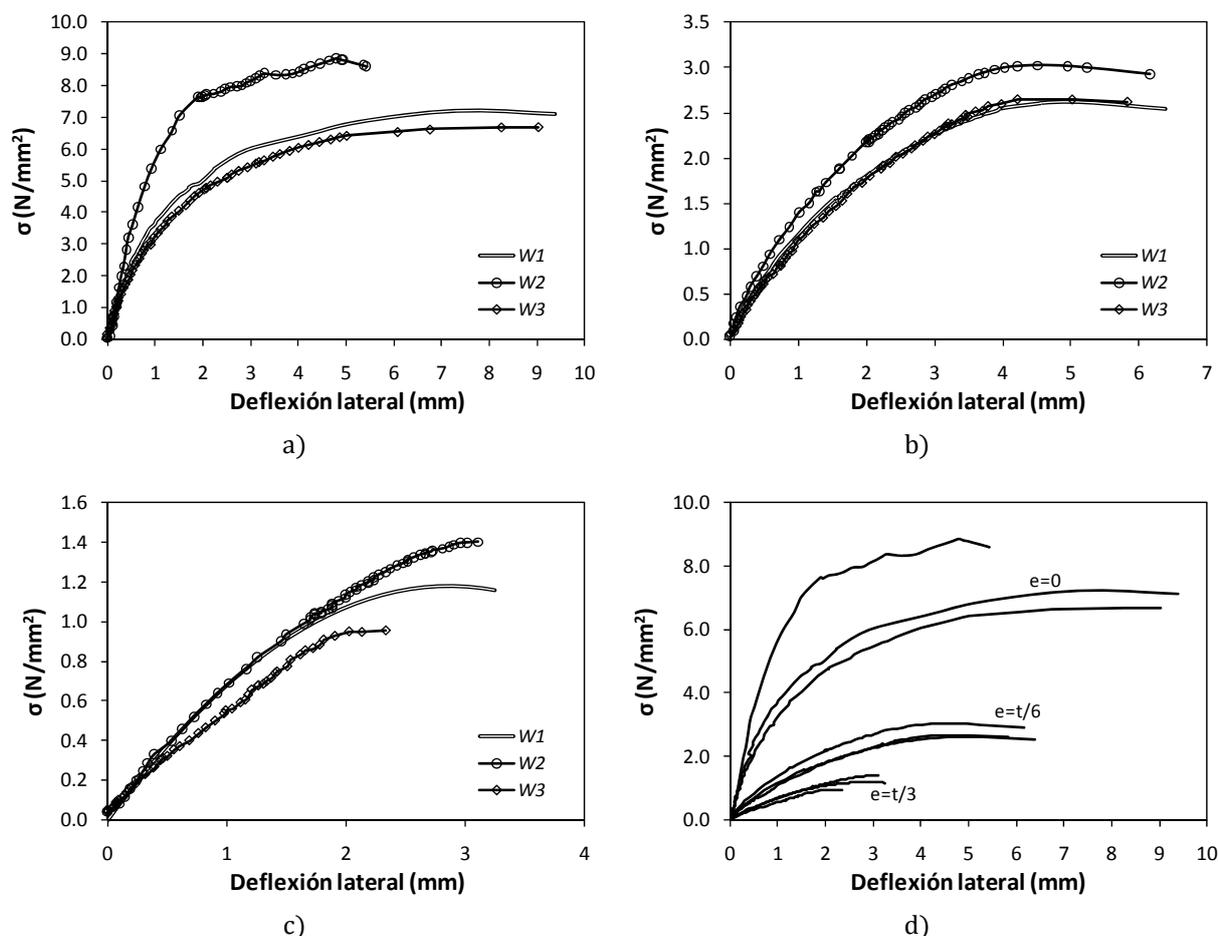


Figura 3.21 - Diagramas tensión - deflexión lateral para la serie W25: a) $e = 0$; b) $e = t/6$; c) $e = t/3$; d) agrupadas.

En ambas figuras se observa que la forma deformada de cada serie muestra un comportamiento coherente, de acuerdo con cada condición de excentricidad. Existe, con todo, una clara excepción a este comportamiento en la serie W25, con excentricidad $e = 0$. En cada serie de gráficas se aprecia un comportamiento similar entre tensión y deformación lateral. Las mayores deformaciones laterales se alcanzan, en ambos casos (serie W18 y serie W25), para carga vertical centrada (excentricidad nula). Esto era, en cierto sentido, esperable pues ocurre una distribución más homogénea de tensiones a través de la sección transversal. Este hecho retarda la aparición de secciones bajo tensiones de tracción. Bajo carga concéntrica, la deformación lateral máxima de las paredes es aproximadamente un 17% y un 25% del espesor de la pared para razones de esbeltez 18.7 y 25.6 respectivamente.

En las figuras 3.20d y 3.21d se muestra un resumen con todos los casos agrupados por condición de excentricidad. El comportamiento muestra buen acuerdo en cada serie de experimentos y reafirma el fuerte impacto que tiene la excentricidad de la carga sobre la capacidad resistente.

En la figura 3.22 se muestran los gráficos que relacionan la tensión y la deflexión lateral de acuerdo con la excentricidad de la carga (casos $e = t/6$ y $e = t/3$). En estos gráficos se ha incluido la deflexión lateral registrada para los casos de la serie W12. En las gráficas, conforme aumenta la excentricidad, la pendiente inicial de las curvas disminuye. Sin embargo, para el caso $e = t/3$, llama la atención que la deformación lateral máxima parece no presentar relación con la esbeltez de la pared, ya que todos los experimentos exhibieron una deformación lateral similar (entre 2.5 y 3.5 mm) al momento del colapso.

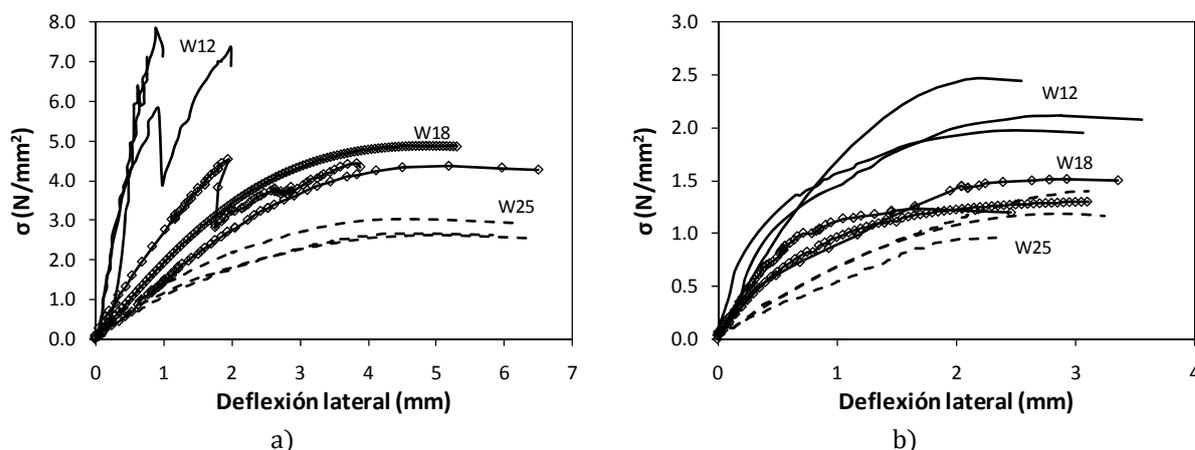


Figura 3.22 - Diagramas tensión – deflexión lateral de acuerdo con la excentricidad de la carga: a) $e = t/6$; b) $e = t/3$.

3.4.3. Modos de rotura

Los experimentos presentaron diferentes modos de fallo en función de su relación de esbeltez y la excentricidad de carga. El modo general de colapso de las paredes de menor esbeltez (es decir, las paredes de las series W6 y W12) con carga concéntrica fue por aplastamiento del material. Estas paredes exhibieron gran desprendimiento de material acompañado de grietas verticales (figura 3.23). Para los experimentos bajo excentricidad $e = t/6$, el fallo se produjo por aplastamiento acompañado de desprendimiento superficial de algunas unidades ubicadas generalmente en o cerca de las hiladas superiores o inferiores de las paredes. Por el contrario, para excentricidad $e = t/3$, el fallo se produjo por apertura de junta de mortero en el lado bajo tensiones de tracción, con casi ningún efecto de aplastamiento (figura 3.24). Este modo de fallo se alcanzó a bajos niveles de carga.

Bajo carga concéntrica, las paredes más esbeltas (es decir, las paredes de las series W18.7 y W25.6) presentaron una deformación lateral considerable antes del colapso. En estos casos, el modo general de rotura observado se debió a la apertura de una junta horizontal aproximadamente a media altura de la pared. Las paredes de la serie W25 mostraron la mayor deformación lateral, siendo en promedio alrededor de 9,5 mm al momento del colapso. Esta serie, junto con las paredes de la serie W18, exhibió un colapso explosivo a altos niveles de carga con desprendimiento de material en la zona de la altura media por plastificación del lado comprimido. La figura 3.25 muestra una secuencia de imágenes en la que se observa el modo de rotura por pandeo de una pared de esbeltez 18.7 y excentricidad nula.

Bajo carga excéntrica, las paredes de las series W18 y W25 mostraron un fallo por apertura de junta horizontal a media altura. Este colapso se produjo de forma repentina a bajos niveles de carga, después de una incipiente deformación lateral. La figura 3.26 muestra una secuencia de imágenes en la que se observa el modo de rotura por pandeo de una pared de esbeltez 25.6 y excentricidad $e = t/6$, mientras que la figura 3.27 muestra la secuencia para una pared de esbeltez 25.6 y excentricidad $e = t/3$.

Los modos de rotura observados en la presente campaña están en acuerdo con los modos reportados en campañas previas referidas en el capítulo 2.

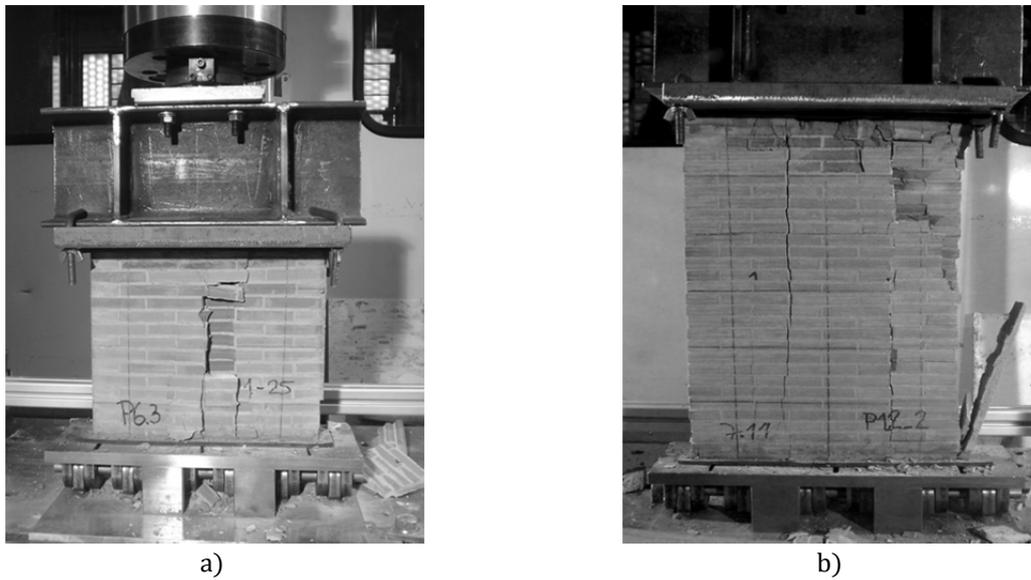


Figura 3.23 - Modos experimentales de rotura para $e = 0$: a) serie W6; b) serie W12



Figura 3.24 - Modo experimental de rotura para $e = t/3$, serie W12.



a)



b)



c)



d)

Figura 3.25 - Secuencia de rotura para una pared de esbeltez 18.7 y excentricidad nula.

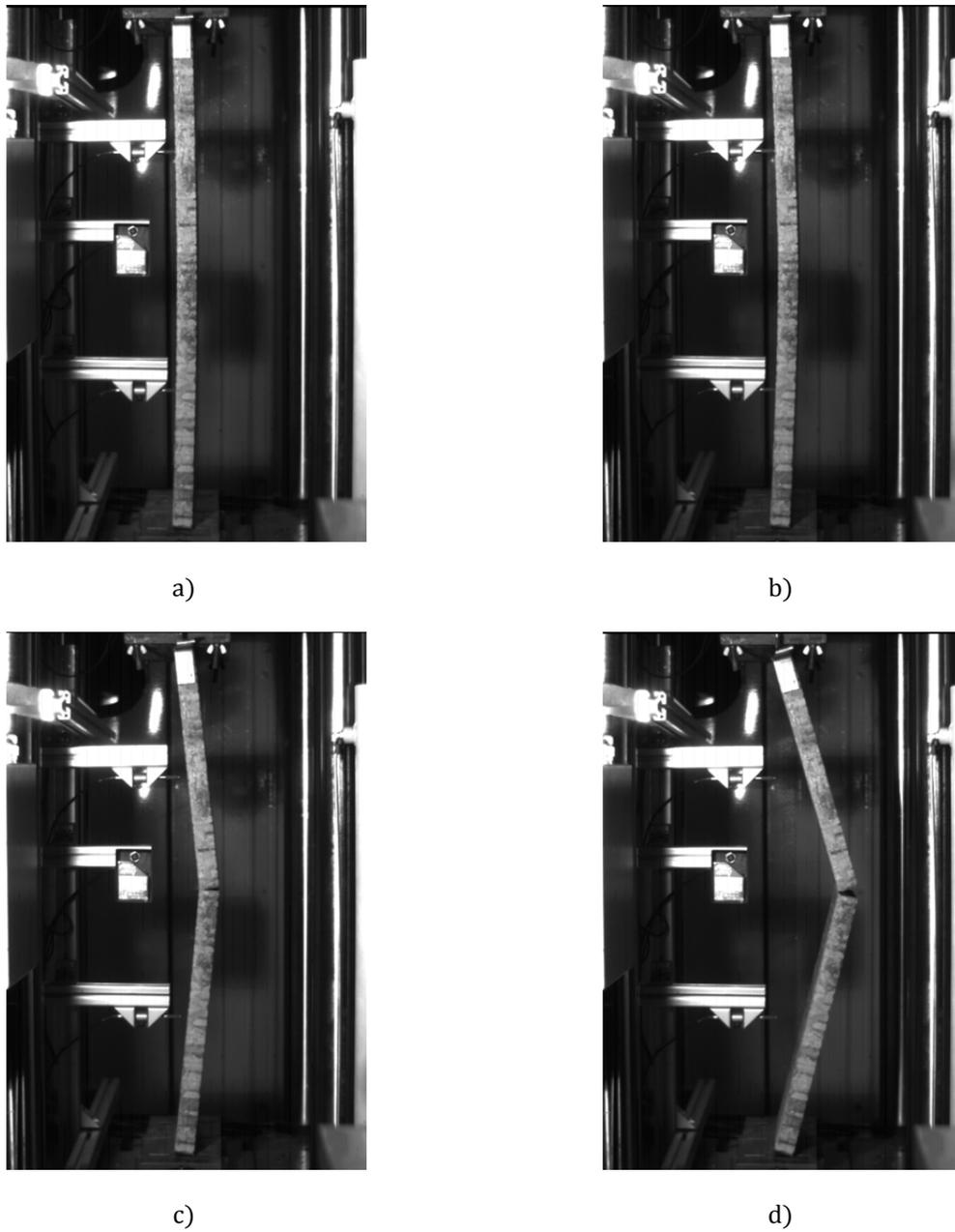


Figura 3.26 - Secuencia de rotura para una pared de esbeltez 25.6 y excentricidad $e = t/6$.

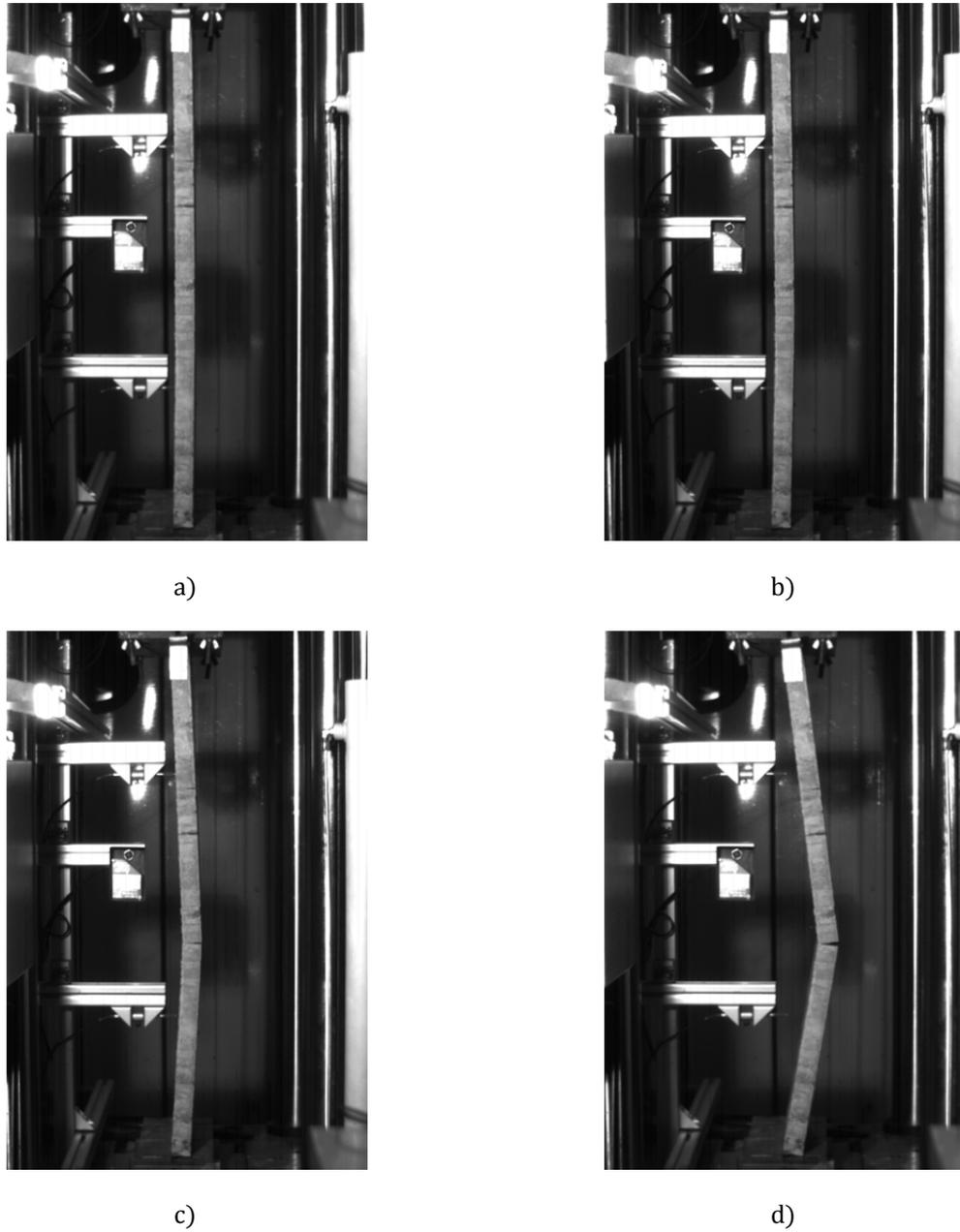


Figura 3.27 - Secuencia de rotura para una pared de esbeltez 25.6 y excentricidad $e = t/3$.

3.5. Cálculos usando Eurocódigo 6

En el presente apartado, los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación, junto con otros disponibles en la literatura (Watstein y Allen, 1970; Kirtschig y Anstötz, 1991; y Hasan y Hendry, 1976), son comparados con predicciones calculadas mediante Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005). Las relaciones reales para E/f_c correspondientes a las diferentes campañas experimentales utilizadas en esta comparación se encuentran resumidas en la tabla 3.6 (apartado 3.2.3.1.) del presente capítulo.

Para propósitos de comparación con los resultados experimentales, en las fórmulas propuestas por Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) - referidas en el capítulo 2, apartado 2.4.2.1. - el factor de seguridad parcial γ_M del material ha sido considerado igual a uno, mientras que no se ha considerado excentricidad por creep. Para el caso de excentricidad nula, se ha considerado la excentricidad mínima igual a $e = 0.05t$, donde t es el espesor de la pared.

La figura 3.28 muestra la comparación entre los resultados experimentales promedio y los resultados calculados con Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005). En estos casos evaluados, el método propuesto por la normativa tiende a subestimar conservadoramente la resistencia de los muros. La subestimación aumenta con la razón de esbeltez y la excentricidad de la carga. En cálculos prácticos, esta subestimación podría estar compensada con la consideración de un módulo de Young más elevado, tal como $E = 1000f_c$, como con frecuencia se asume.

3.6. Discusión

Resultados experimentales sobre paredes de obra de fábrica tomando en cuenta diferentes razones de esbeltez y excentricidad de la carga han sido presentados y discutidos. Esta campaña ha sido llevada a cabo empleando una técnica experimental basada en los trabajos previos de Lobato (2009) y Charry (2010), y muestra que es posible obtener valiosa información sobre el comportamiento al pandeo de muros de obra de fábrica usando modelos reducidos a escala 1:4.

Un total de 36 paredes han sido ensayadas satisfactoriamente hasta el colapso. Los resultados obtenidos muestran similar tendencia que aquellos reportados por campañas experimentales previas. También se ha observado que las diferencias en los resultados individuales están dentro del orden de magnitud de la dispersión reportada típicamente en este tipo de ensayos. En otras palabras, los resultados de diferentes autores están en acuerdo excepto por diferencias que pueden atribuirse a una dispersión esperada o común en este tipo de experimentos.

Los patrones de falla obtenidos en la presente campaña muestran buen acuerdo con la evidencia experimental reportada en la literatura disponible. Como era esperable, los modos de rotura resultantes están claramente asociados con la excentricidad de la carga y la razón de esbeltez de los muros. Las paredes sometidas a carga concéntrica con esbeltez mayor o igual a 18 son muy propensas a colapsar por pandeo. Este comportamiento incrementa dramáticamente con la excentricidad de la carga.

En la presente campaña, el uso de elementos de neopreno en los extremos de las paredes ensayadas proporcionó una manera simple y precisa para implementar la condición de apoyo articulada.

Por último, ya que una predicción fiable del módulo elástico es fundamental en el diseño y verificación de muros de obra de fábrica, existe una necesidad de conciliar los criterios de las actuales normativas con mayor evidencia experimental. Algo similar sucede con la resistencia a tracción, que presenta una influencia importante cuando la razón de esbeltez y la excentricidad de la carga aumentan. Esta característica debería también ser tomada en cuenta en cualquier análisis realista de carga de colapso.

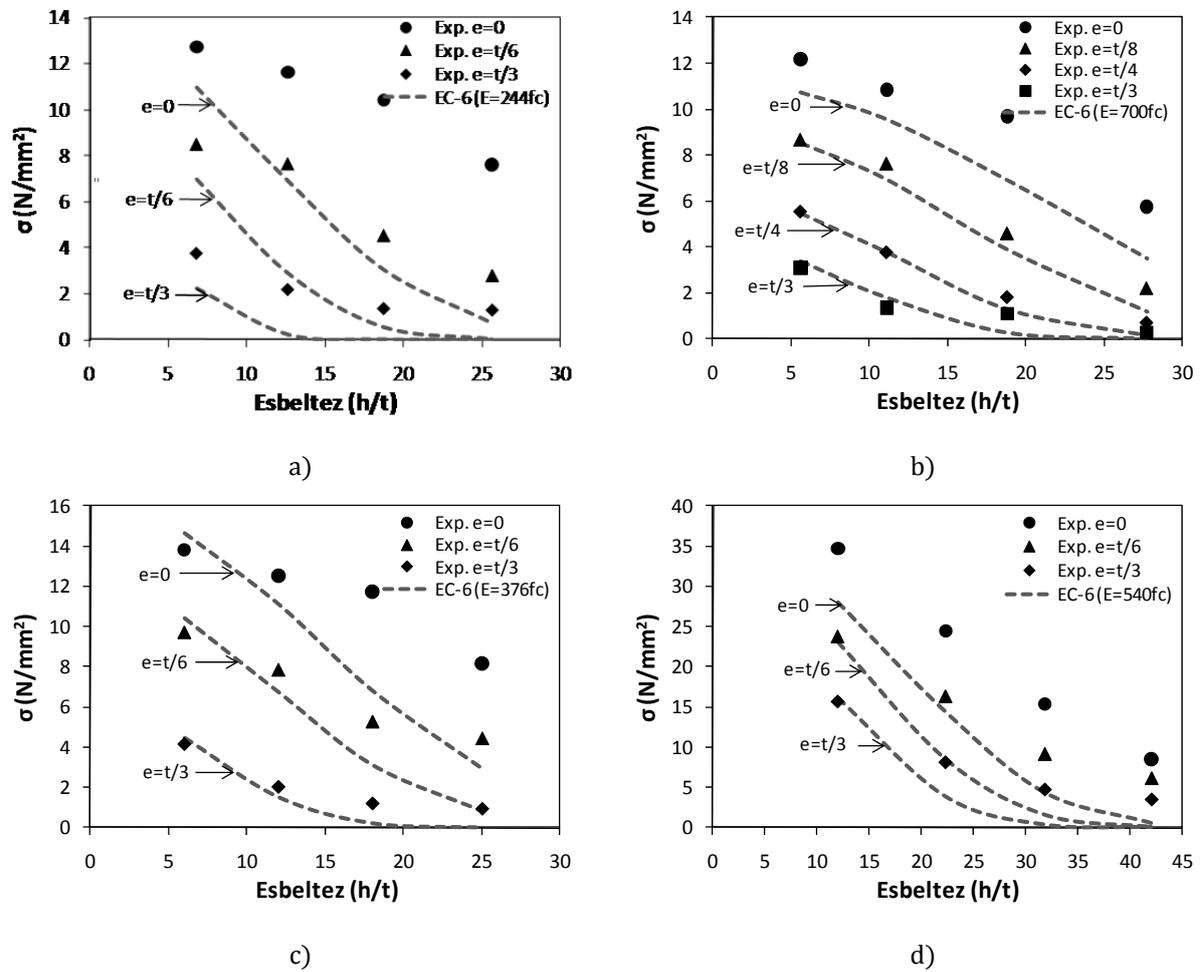


Figura 3.28 – Comparación entre Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) y tensiones experimentales últimas promedio: a) presente investigación; b) Kirtschig y Anstötz, 1991, c) Hasan y Hendry, 1976; d) Watstein y Allen, 1970.

4

Simulación numérica

4.1. Introducción

La irrupción de sofisticadas herramientas numéricas, capaces de simular el comportamiento del material a través de modelos constitutivos apropiados, ha abierto un valioso y amplio campo de investigación.

Probablemente, los micro-modelos sean, hoy en día, una de las herramientas disponibles más precisas para modelar el comportamiento en elementos la obra de fábrica. Esta estrategia permite considerar diferentes mecanismos de fallo que ocurren de manera localizada en o a través de las juntas de mortero, e incluso en las unidades, si éstas son modeladas con fisuras potenciales. En particular, esta estrategia permite una apropiada simulación del fallo por tracción en las juntas (apertura de juntas) en combinación con el fallo por aplastamiento del material bajo compresión.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente capítulo se evalúa la capacidad de un micro-modelo simplificado para obtener la respuesta última de paredes mediante comparación con los resultados experimentales descritos en el capítulo anterior y con otros resultados disponibles en la literatura (Watstein y Allen, 1970; Hasan y Hendry, 1976; Kirtschig y Anstötz, 1991).

Cabe notar que la mayor parte de la experimentación disponible en este ámbito de investigación se ha dirigido al estudio de muros ensayados bajo condición bi-articulada y de simple apoyo, esto último significa que los muros han sido ensayados entre los platos rígidos de la prensa. En particular, la mayor

cantidad de resultados sistemáticos disponibles han empleado la condición bi-articulada. Otras condiciones de apoyo han recibido insuficiente atención en la literatura. Por este motivo, para la validación del modelo numérico han sido considerados solo resultados experimentales que ocupan esta condición de apoyo.

4.1.1. Objetivos

El objetivo principal de este capítulo es evaluar la capacidad de un modelo numérico para predecir la respuesta última de paredes de obra de fábrica teniendo en cuenta el comportamiento al pandeo. Debe notarse que en este tipo de simulación, las principales características del comportamiento están relacionadas con la fisuración por tracción en las interfaces unidad-mortero (abertura por tracción), por la plastificación del material por compresión y por la no-linealidad geométrica (grandes desplazamientos).

Este objetivo general se desarrolla según las siguientes tareas específicas:

- Describir el enfoque numérico adoptado en el presente estudio, así como también justificar los parámetros elásticos e inelásticos empleados en las diversas simulaciones numéricas.
- Evaluar y comparar las predicciones numéricas con los resultados experimentales. Para esta evaluación se utilizan los resultados experimentales obtenidos en la campaña experimental descrita en el capítulo 3 y resultados experimentales reportados por otros autores (descritos en el capítulo 2, apartado 2.5).
- Validar el modelo numérico con vistas a estudios paramétricos detallados;
- Obtener conclusiones generales y particulares derivadas del análisis comparativo de resultados.

4.1.2. Organización del estudio

En una primera parte del capítulo se describe el enfoque numérico adoptado, junto con la configuración geométrica y los respectivos parámetros de entrada. A continuación, en el apartado 4.3, se comparan las predicciones numéricas con los resultados experimentales. Dicha comparación alcanza tanto a tensiones de rotura, deflexiones laterales máximas y modos de fallo.

Tras el análisis y comparación de resultados, se extraen las principales observaciones y conclusiones derivadas de la evaluación del desempeño del modelo numérico. Con esta metodología se pretende validar el modelo numérico seleccionado para su empleo posterior en estudios paramétricos generalizados.

4.2. Enfoque numérico adoptado

El enfoque numérico adoptado en el presente estudio corresponde al micro-modelo simplificado propuesto por Lourenço y Rots (1997). Esta técnica ha demostrado reproducir satisfactoriamente el comportamiento observado en estructuras y elementos de obra de fábrica (Rosas et al., 2001; Oliveira, 2002; Lourenço et al., 2005; Viviescas, 2009; Lobato, 2009; entre otros).

La micro-modelización simplificada utiliza unidades expandidas en ambas direcciones que se modelan como elementos continuos, mientras que el comportamiento de las juntas de mortero y la interface unidad-mortero se agrupan en elementos de interface de espesor nulo. Esta estrategia queda ilustrada en

la figura 4.1. Esta figura muestra que, debido al espesor nulo inherente de la formulación de los elementos de interface, el tamaño de las unidades h_u tiene que expandirse de acuerdo con el espesor del mortero h_m en ambas direcciones. Además, esta estrategia puede incorporar el fallo por tracción en unidades si éstas son modeladas con fisuras potenciales.

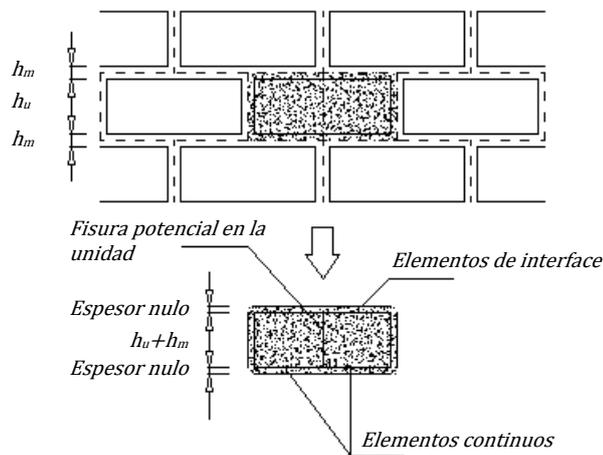


Figura 4.1 - Estrategia para la micro-modelización simplificada (adaptada de Lourenço y Rots; 1997)

4.2.1. Formulación del modelo

Básicamente, este modelo de interface compuesta asume que las unidades (ladrillos) se comportan de manera elástica, mientras el comportamiento no-lineal se concentra en las interfaces (juntas). El dominio de este modelo está limitado por una superficie de fluencia compuesta que se muestra en la figura 4.2. Esta superficie de fluencia incluye rotura a tracción (modo I de fallo), una envolvente friccional tipo Coulomb para rotura por corte (modo II de fallo) y un modelo de capas para el fallo por compresión para el material compuesto. El softening o reblandecimiento actúa en los tres modos de rotura y es precedido por endurecimiento (hardening) en el caso del modo de fallo por compresión.

En la figura 4.2, f_c es la resistencia a compresión, f_t es la resistencia a tracción, c es la cohesión y ϕ es el ángulo de fricción.

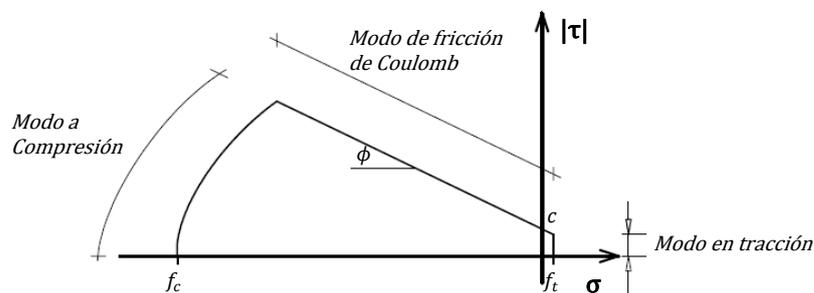


Figura 4.2 - Modelo de interface compuesta (Lourenço y Rots, 1997)

Modo en Tracción

En el modo de fallo por tracción se genera una fisura cuando la tensión principal de tracción de la interface supera el valor de la resistencia a tracción f_t , una vez superada esta resistencia el criterio especifica una caída gradual hasta cero de la tensión siguiendo una función exponencial de reblandecimiento (softening) que depende, además de la resistencia a tracción, de la energía de fractura en modo I (G_f^I). Esta energía de fractura corresponde al área bajo la curva de reblandecimiento por tracción, como se observa en la figura 4.3a. En la figura, Δu_n corresponde al desplazamiento relativo normal a la interface (ancho de fisura) en el que se deja de transferir tensión.

Modo en Corte

Basado en micro-experimentos realizados por Van der Pluijm (1993), el modo de fallo a cortante se evalúa en función de la cohesión c de la interface unidad-mortero, $\tan\phi$ (donde ϕ corresponde al ángulo de fricción interna), $\tan\psi$ (donde ψ corresponde al coeficiente de dilatancia) y la energía de fractura en modo II (G_f^{II}), que corresponde al área bajo la curva exponencial por softening asumida para la cohesión. En este modo de fallo, el deslizamiento ocurre en cuanto la combinación de tensiones de compresión y corte excede la envolvente de rotura. La figura 4.3b muestra la función de fluencia que reduce gradualmente como consecuencia del reblandecimiento ante el incremento del deslizamiento Δu_t en la interface.

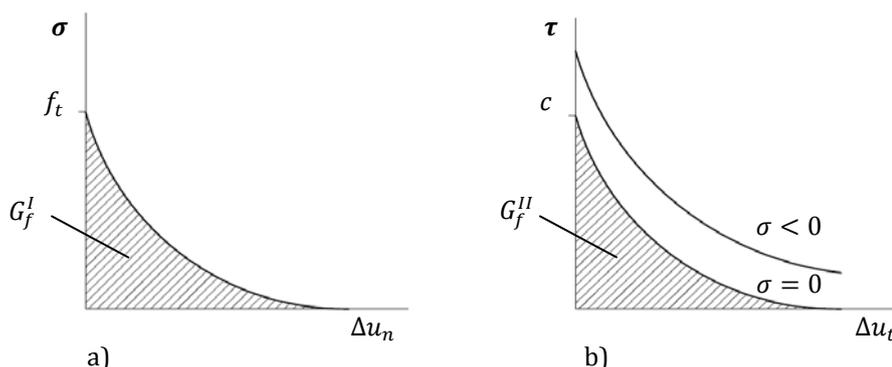


Figura 4.3 - Modelo de interface compuesta: a) Comportamiento en tracción (modo I); b) Comportamiento en corte (modo II) (Lourenço, 1996b).

Modo en Compresión

El modo de rotura en compresión está basado en un modelo de interface elipsoide, cuya ley de endurecimiento/reblandecimiento se muestra en la figura 4.4. En la ley propuesta en este modelo, κ_p corresponde a la deformación al momento de la máxima tensión en compresión f_c (resistencia a compresión de la fábrica). Esta curva, que fue ajustada para adaptarse a gráficas tensión-deformación obtenidas experimentalmente, puede ser usada en elementos de interface debido a que el modelo establece una relación directa entre tensiones y desplazamientos Δu_n .

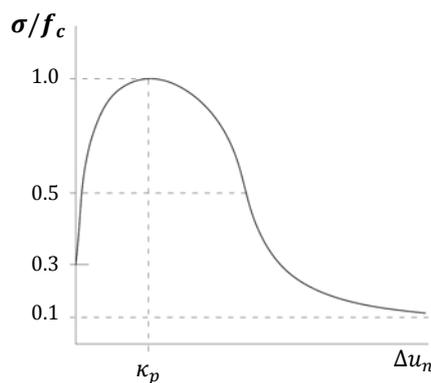


Figura 4.4 – Modelo de interface compuesta. Comportamiento en compresión.

4.2.2. Configuración adoptada

La modelización numérica se realizó considerando un modelo 2D en tensión plana. Los análisis fueron llevados a cabo mediante control por desplazamiento, considerando no-linealidad geométrica. Todas las simulaciones fueron desarrolladas empleando el software DIANA (TNO Diana, 2005).

La condición articulada en las simulaciones numéricas fue modelada a través de objetos triangulares rígidos ubicados en los extremos superior e inferior de la pared y a cuyos vértices se les permitió libre rotación. Además, en aquellos casos bajo carga concéntrica se consideró una excentricidad mínima de 1 mm en orden a tomar en cuenta posibles irregularidades en la geometría del muro o en la posición de la carga. Debe notarse que una excentricidad mínima, aunque sea muy pequeña, es necesaria para activar numéricamente la respuesta no-lineal dirigida a obtener el fallo por inestabilidad.

En las simulaciones, las unidades se representaron mediante elementos continuos de 8 nodos (figura 4.5a), mientras que las juntas, mediante elementos de interface de 6 nodos de espesor nulo (figura 4.5b). De acuerdo con Martini (1998), uno de los aspectos clave en la precisión de los modelos generados es el refinamiento de la malla de elementos finitos empleada. Por esta razón, los modelos producidos en el presente estudio consideraron un mayor número de divisiones en el sentido horizontal (espesor de la pared). De esta forma, cada unidad se modeló con 12x3 elementos. La figura 4.6 muestra la configuración y mallado típico usado en las diversas simulaciones numéricas.

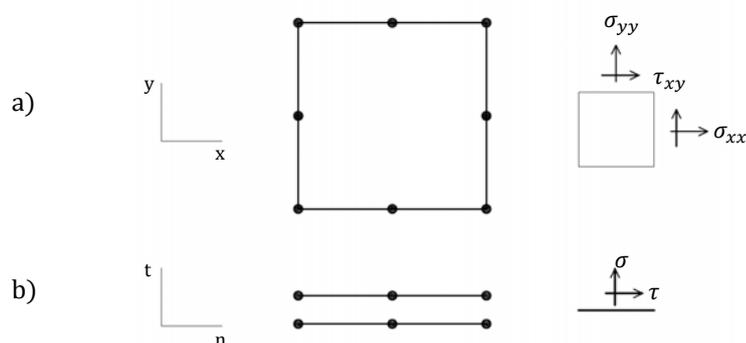


Figura 4.5 – Elementos finitos empleados en la presente investigación: a) elemento de 8 nodos para las unidades; b) elementos de 6 nodos para las interfaces.

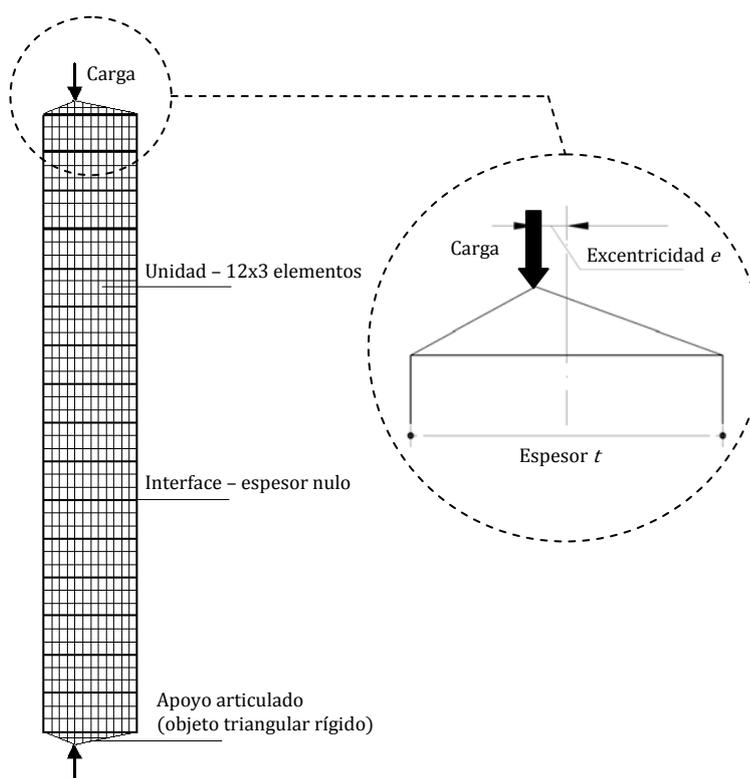


Figura 4.6 – Configuración y mallado típico utilizado en las simulaciones

4.2.3. Parámetros elásticos e inelásticos del modelo

El uso del enfoque de micro-modelización requiere una serie de parámetros elásticos e inelásticos como datos de entrada. Con el objeto de llevar a cabo la simulación de ensayos experimentales, parte de estos parámetros han sido estimados como se describe a continuación debido a que no existen mediciones experimentales directas disponibles.

Una parte importante en cualquier calibración de un micro-modelo reside en el ajuste del módulo elástico de la fábrica. Para su correcta representación, en el enfoque empleado existe dos parámetros esenciales: el módulo elástico asignado a la unidad E_b y el valor de la constante de rigidez normal de la interface k_n (parámetro equivalente al módulo elástico del mortero).

En orden a reproducir numéricamente los ensayos llevados a cabo en la presente investigación, se preparó un modelo de elementos finitos de similares dimensiones a la probeta empleada para caracterizar la resistencia a compresión de la fábrica (figura 4.7a). Con este modelo se calibró la constante k_n , que ha sido ajustada para reproducir el módulo elástico promedio de la fábrica ($E = 3458 \text{ N/mm}^2$), obteniendo un valor de $k_n = 2380 \text{ N/mm}^3$. En la calibración del modelo fueron utilizadas las propiedades medias de resistencia a compresión $f_c = 14.2 \text{ N/mm}^2$ y módulo elástico del ladrillo $E_b = 4080 \text{ N/mm}^2$, medidas experimentalmente.

La figura 4.7b muestra el diagrama $\sigma - \varepsilon$ obtenido a partir de la modelación numérica junto a dos curvas experimentales. Se puede observar que el resultado numérico se ajusta satisfactoriamente al comportamiento mostrado por los experimentos.

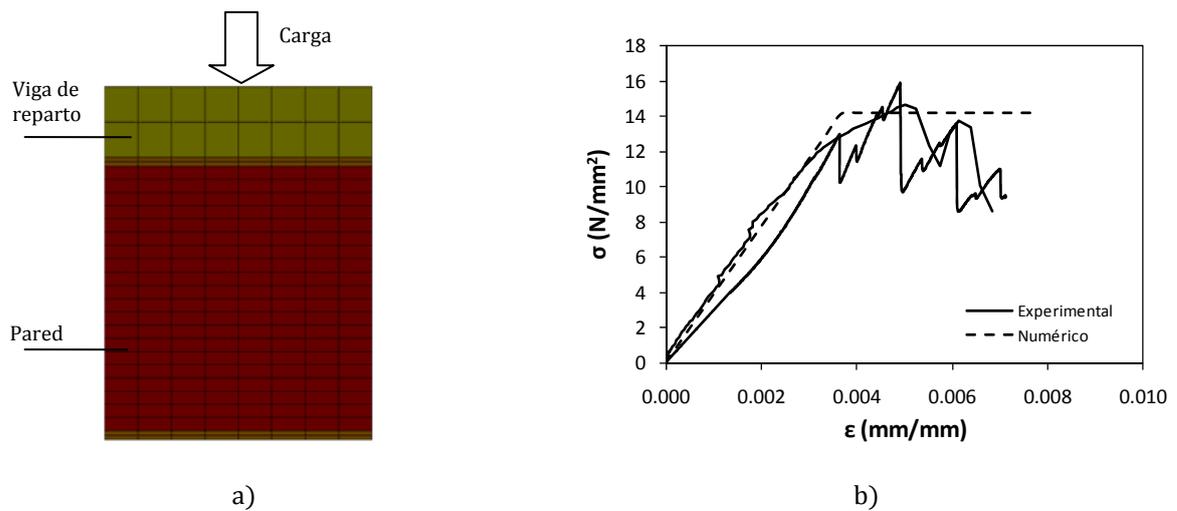


Figura 4.7 – a) Micro-modelo probeta; b) Diagrama $\sigma - \epsilon$ experimental (en duplicado) y numérico

En relación a la simulación numérica de resultados experimentales reportados por otros autores, gran parte de los parámetros elásticos e inelásticos necesarios han sido estimados como se describe a continuación debido a que no existen mediciones experimentales disponibles.

Mientras el módulo de Young E de la fábrica, medido experimentalmente, ha sido reportado por todas las campañas experimentales consideradas, no existe información sobre el módulo de Young de las unidades y del mortero. Debido a esta falta de disponibilidad de datos experimentales directos para la definición de los parámetros E_b y k_n , ha sido necesario ajustarlos para reproducir el comportamiento global en términos de deformabilidad de los muros. Para ello, sin embargo, existen muchas combinaciones de E_b y k_n que pueden ser empleadas para este propósito. Para decidir una posible combinación de estos parámetros, en el presente estudio E_b ha sido estimado a partir de la relación $f_b \cdot (E/f_c)$, donde f_b y f_c son las resistencias a compresión de las unidades y de la fábrica respectivamente (ver tabla 4.1). Luego, k_n ha sido ajustada para reproducir el módulo de Young promedio de los muros reportado en los experimentos.

Tabla 4.1 – Valores experimentales empleados para estimar E_b

Campaña	E [N/mm ²]	f_c [N/mm ²]	E/f_c [-]	f_b [N/mm ²]
Watstein y Allen (1970)	21160	39.2	540	76.5
Kirtschig y Anstötz (1991)	8522	12.2	700	20.9
Hasan y Hendry (1976)	6530	17.4	376	28.0

En ausencia de más información, la otra propiedad elástica de las juntas, la constante de rigidez por corte de la interface k_s , ha sido calculada directamente a partir de la constante de rigidez normal, asumiendo que la teoría de la elasticidad es aplicable (Lourenço et al., 2005), como:

$$k_s = \frac{k_n}{2(1 + \nu)} \tag{4.1}$$

donde ν es el coeficiente de Poisson, cuyo valor se asume igual a 0.15.

Los parámetros elásticos e inelásticos empleados en todos los análisis numéricos se resumen en la tabla 4.2. En el caso de las simulaciones de la campaña de Watstein y Allen (1970), la resistencia a tracción de la fábrica f_t ha sido estimada a partir de la resistencia a flexotracción f_{xt} reportada por los autores, usando la siguiente correlación dada por la Instrucción Española de Hormigón Estructural EHE (2008), donde h es la altura de la probeta ensayada transversalmente:

$$f_t = f_{xt} \cdot \frac{1.5 \cdot \left(\frac{h}{100}\right)^{0.7}}{1 + 1.5 \cdot \left(\frac{h}{100}\right)^{0.7}} \quad [4.2]$$

Para el caso de las simulaciones de las campañas de Kirtschig y Anstötz (1991) y Hasan y Hendry (1976), la resistencia a tracción f_t fue estimada como el 2% de la resistencia a compresión (Yokel, 1971).

Otros parámetros de entrada requeridos por el modelo (G_f^I , G_f^{II} , G_c , c , $\tan\phi$, $\tan\psi$) fueron adoptados en acuerdo con valores experimentales reportados por Van der Pluijm (1999) o recomendados por Lourenço (1996b) para interfaces unidad-mortero. En particular, la energía de fractura en modo I (G_f^I) y en modo II (G_f^{II}) se han estimado como el 10% de la resistencia a tracción f_t y el 10% de la cohesión c respectivamente. Mientras que la energía de fractura en compresión se ha estimado como:

$$G_c = 15 + 0.43f_c - 0.0036f_c^2 \quad [4.3]$$

donde f_c es la resistencia a compresión de la fábrica.

Para propósitos de simulación, la tangente del ángulo de fricción ($\tan\phi$) puede adoptar un valor igual a 0.75 y la tangente del ángulo de dilatación ($\tan\psi$) un valor cercano a 0 (pero mayor que 0), independientemente del tipo de unidad y mortero utilizado (CUR, 1997; Lourenço, 1996b).

Tabla 4.2 – Resumen de parámetros empleados en las simulaciones numéricas

Componente	Parámetro	Símbolo	Unidad	Presente Campaña	Watstein y Allen	Kirtschig y Anstötz	Hasan y Hendry
Unidad	Módulo elástico	E_b	N/mm ²	4080	41294	14635	10528
	Coef. de Poisson	ν	-	0.15	0.15	0.15	0.15
Junta	Rigidez normal	k_n	N/mm ³	2380	920	80	475
	Rigidez de corte	k_s	N/mm ³	1035	400	35	207
	Resistencia a tracción	f_t	N/mm ²	0.55	1.75	0.2	0.35
	Energía de fractura en modo I	G_f^I	Nmm/mm ²	0.05	0.175	0.02	0.035
	Cohesión	c	-	0.45	1.31	0.45	0.45
	Energía de fractura en modo II	G_f^{II}	Nmm/mm ²	0.045	0.131	0.045	0.045
	Ángulo de fricción interna	$\tan\phi$	-	0.812	0.75	0.75	0.75
	Ángulo de dilatación	$\tan\psi$	-	0.009	0.009	0.009	0.009
	Resistencia a compresión	f_c	N/mm ²	14.20	39.20	12.20	17.30
Apoyo	Energía de fractura en compresión	G_c	Nmm/mm ²	20.38	26.32	19.71	21.57
	Módulo elástico	E	N/mm ²	2.1E+05	2.1E+05	2.1E+05	2.1E+05
	Coef. de Poisson	ν	-	0.15	0.15	0.15	0.15

Para el caso de las simulaciones de la presente investigación, $\tan\phi$ y la cohesión c han adoptado los valores experimentales reportados por Lobato (2009) para fábrica escala 1:4 (0.812 y 0.45 respectivamente). Para el caso de las simulaciones de las campañas de Kirtschig y Anstötz (1991) y Hasan y Hendry (1976) también se asume $c = 0.45$, mientras que para el caso de las simulaciones de Watstein y Allen (1970) se adopta $c = 1.31$, en acuerdo con el siguiente criterio que limita las tensiones de tracción a través del criterio de fricción en el modelo de Lourenço y Rots (1997):

$$0 \leq f_t \leq \frac{c}{\tan\phi} \quad [4.4]$$

Si bien, los valores de cohesión c dependen de las características de las piezas y morteros utilizadas en los ensayos, el modo de fallo por corte no tiene mayor influencia en el fenómeno de inestabilidad de muros. Cabe notar además que, de acuerdo con Lourenço (1996a), gran parte de los parámetros inelásticos (G_f^I , G_f^{II} , G_c , $\tan\phi$, $\tan\psi$) no influyen significativamente en los resultados de los análisis, por lo que en la presente investigación la atención se ha dirigido solo a los parámetros materiales más relevantes y a la estrategia de modelización.

4.3. Comparación entre resultados experimentales y numéricos

Empleando el enfoque numérico y parámetros descritos anteriormente, en este subapartado se presentan los resultados obtenidos en las diversas simulaciones numéricas y se comparan con los resultados experimentales reportados. Para este propósito, en una primera parte se presentan los resultados comparativos referidos a la presente investigación y, en una segunda, los resultados comparativos referidos a la simulación de otras campañas experimentales consideradas.

4.3.1. Presente investigación

La comparación entre las tensiones de rotura experimentales obtenidas en la presente investigación (reportadas en el capítulo 3) y la tensión de colapso obtenida mediante simulación numérica se presenta en la figura 4.8. Las gráficas en esta figura muestran que la coincidencia entre la respuesta experimental y numérica es satisfactoria, a pesar de la complejidad del fenómeno. Cabe notar que gran parte de los resultados numéricos están contenidos dentro de la dispersión experimental.

El error total absoluto promedio entre resultados experimentales y numéricos es 12.5%. De acuerdo con la excentricidad de la carga, el error absoluto promedio es 12.9%, 15.59% y 9.01% para los casos con $e = 0$, $e = t/6$ y $e = t/3$ respectivamente.

Bajo carga concéntrica, el modelo numérico parece sobrestimar ligeramente la tensión última para los casos de baja esbeltez (6.8 y 12.6), mientras que para los casos de esbeltez más elevada (18.7 y 25.6) parece subestimar dicha tensión (8.8% y 25.9% respectivamente). Esto puede deberse principalmente a diferencias entre la condición de apoyo de la experimentación y la condición idealizada del modelo numérico. Bajo excentricidad $t/6$, el modelo numérico predice tensiones aproximadamente 18% inferiores al valor experimental medio para cada esbeltez, excepto para el caso de esbeltez 6.8 (que es inferior al 1%). Para el caso $e = t/3$, las predicciones numéricas son más cercanas a los valores experimentales medios (error 4.4%) para las esbelteces 6.8, 12.6 y 18.7, mientras que para la esbeltez 25.6 el error producido es de 22%. Cabe notar que este error elevado se produce debido a que los valores absolutos son muy pequeños.

La figura 4.9 presenta los diagramas tensión-deflexión lateral para las razones de esbeltez 18.7 y 25.6. Como puede verse, el acuerdo general entre la deflexión lateral experimental y numérica es aceptable. Estos resultados muestran que el micro-modelo captura satisfactoriamente el comportamiento experimental en términos de deformabilidad lateral y capacidad resistente.

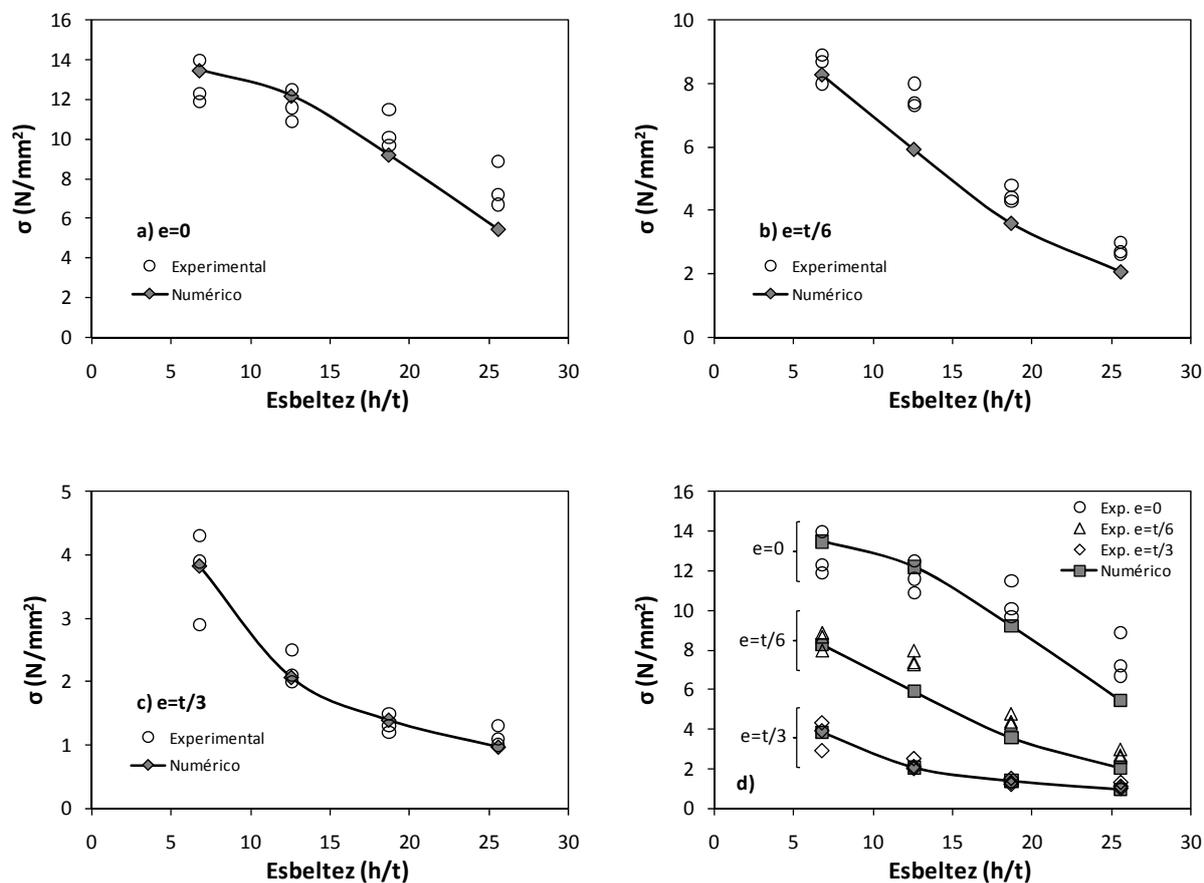


Figura 4.8 – Comparación entre tensión última (σ) numérica y experimental: a) $e=0$; b) $e=t/6$; c) $e=t/3$; y d) agrupadas.

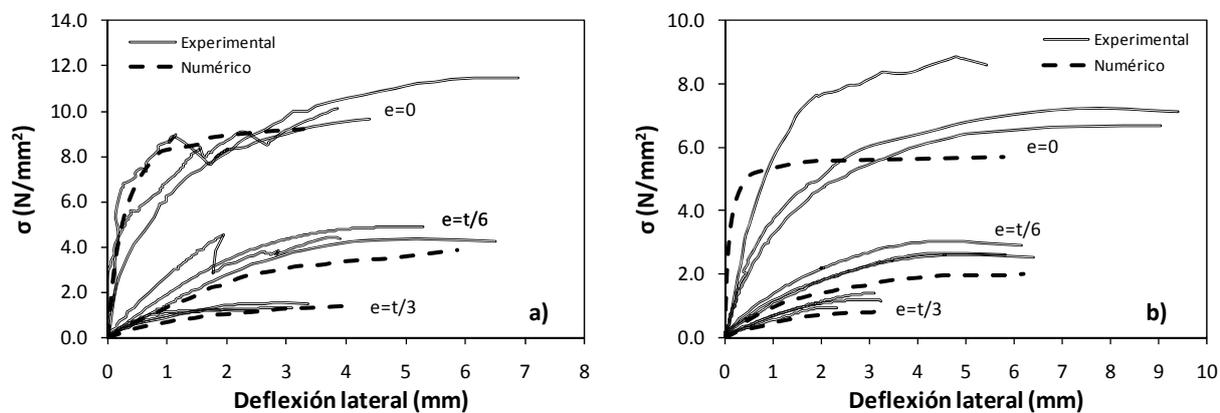


Figura 4.9 – Diagramas tensión-deflexión lateral: a) esbeltez 18.7; b) esbeltez 25.6.

Las tensiones principales de compresión en $[N/mm^2]$, representadas sobre la forma deformada en rotura (último paso de carga), se muestran a continuación para los diferentes modelos generados. En estas figuras se aprecia claramente la distribución de tensiones producida a través de la sección transversal (costado izquierdo bajo tensiones de compresión y costado derecho bajo tensiones de tracción).

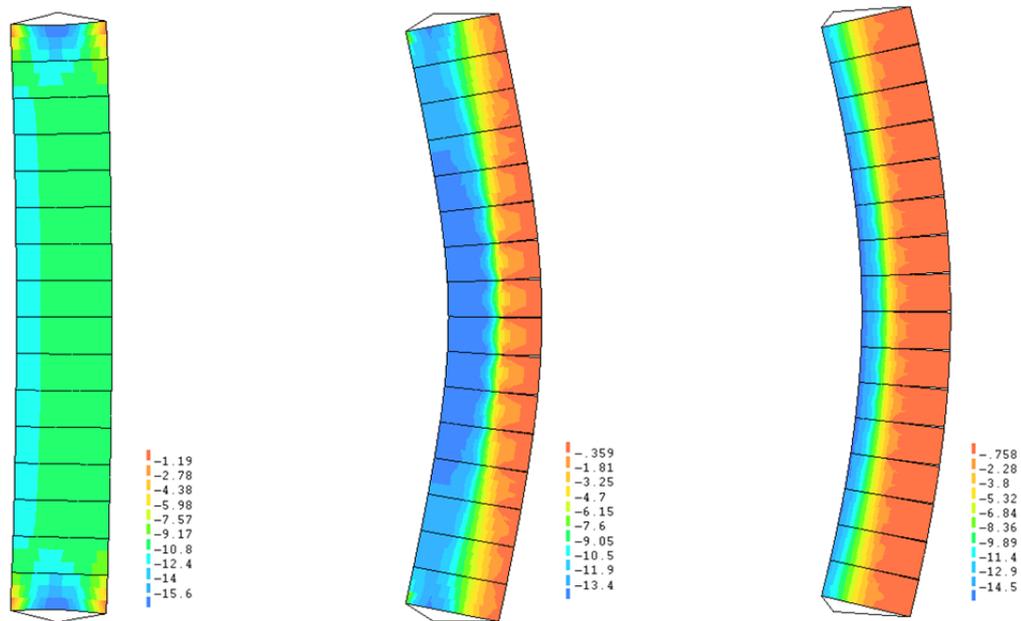


Figura 4.10 - Esbeltez 6.8: Tensiones principales de compresión $[N/mm^2]$ en rotura y deformada

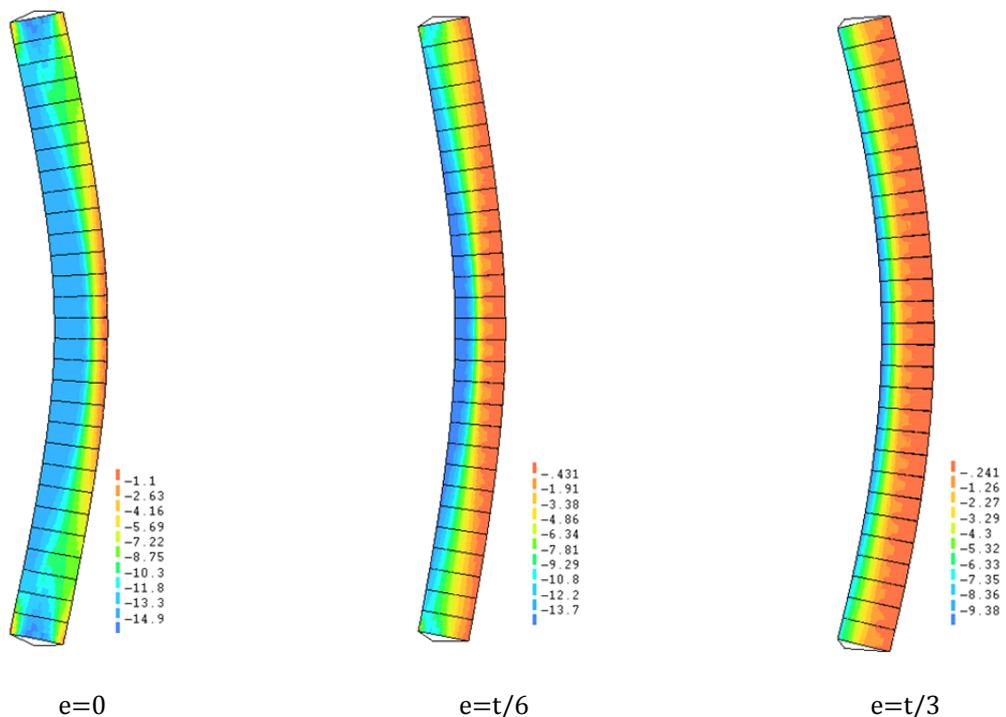


Figura 4.11 - Esbeltez 12.6: Tensiones principales de compresión $[N/mm^2]$ en rotura y deformada.

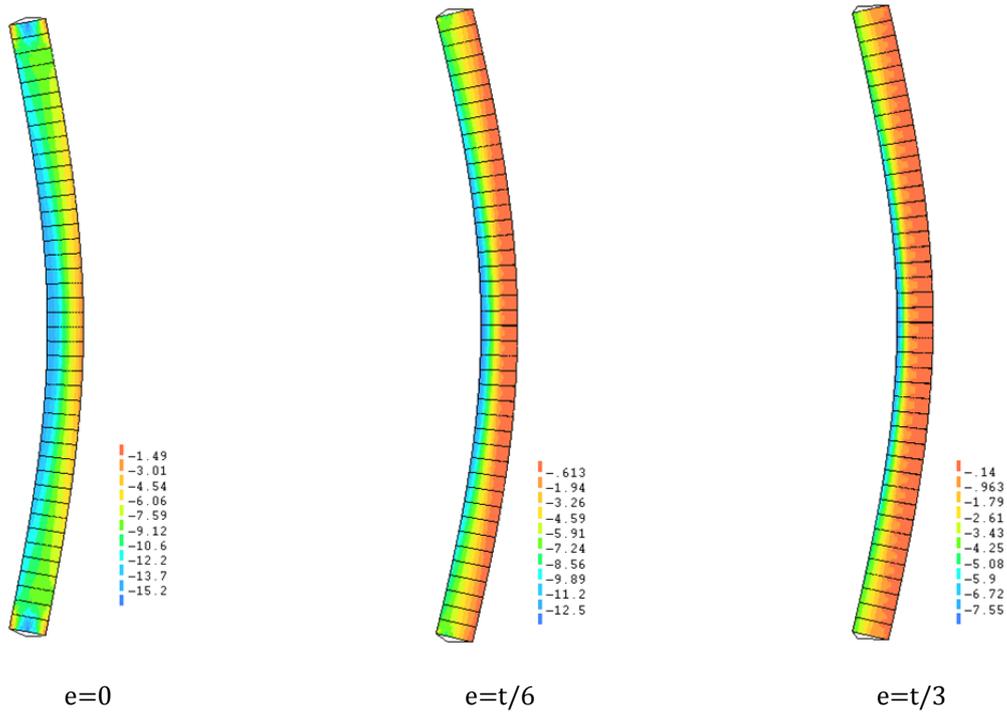


Figura 4.12 - Esbeltez 18.7: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada.

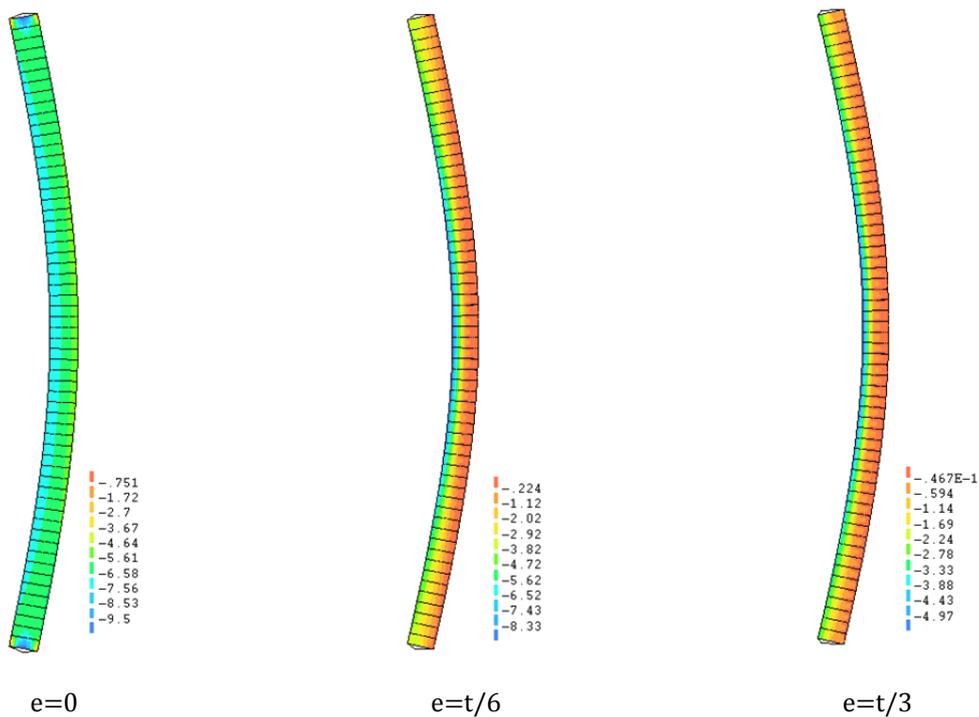


Figura 4.13 - Esbeltez 25.6: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada.

En los diferentes modelos numéricos puede observarse que la zona más crítica corresponde a la zona de altura media de la pared. Este hecho muestra buena correspondencia con los modos observados durante la campaña experimental, particularmente para paredes bajo carga excéntrica.

Bajo carga concéntrica, los modelos muestran un estado tensional predominante en compresión y una deformada que indica fallo final por inestabilidad (excepto para esbeltez 6.8 que es por aplastamiento) a altos niveles de carga. Este hecho es coincidente con las observaciones experimentales.

Bajo carga excéntrica, el fallo general ocurrió por tracción normal a las juntas de mortero en la zona media de la altura y no se apreció aplastamiento por compresión en las unidades. Este comportamiento se reproduce con gran similitud en los modelos numéricos. La figura 4.14 muestra una representación de dos modelos bajo carga excéntrica, en la cual se observa la forma deformada junto con las tensiones principales de compresión y la apertura de interfaces (juntas), correspondientes a la situación de rotura (último paso de carga).

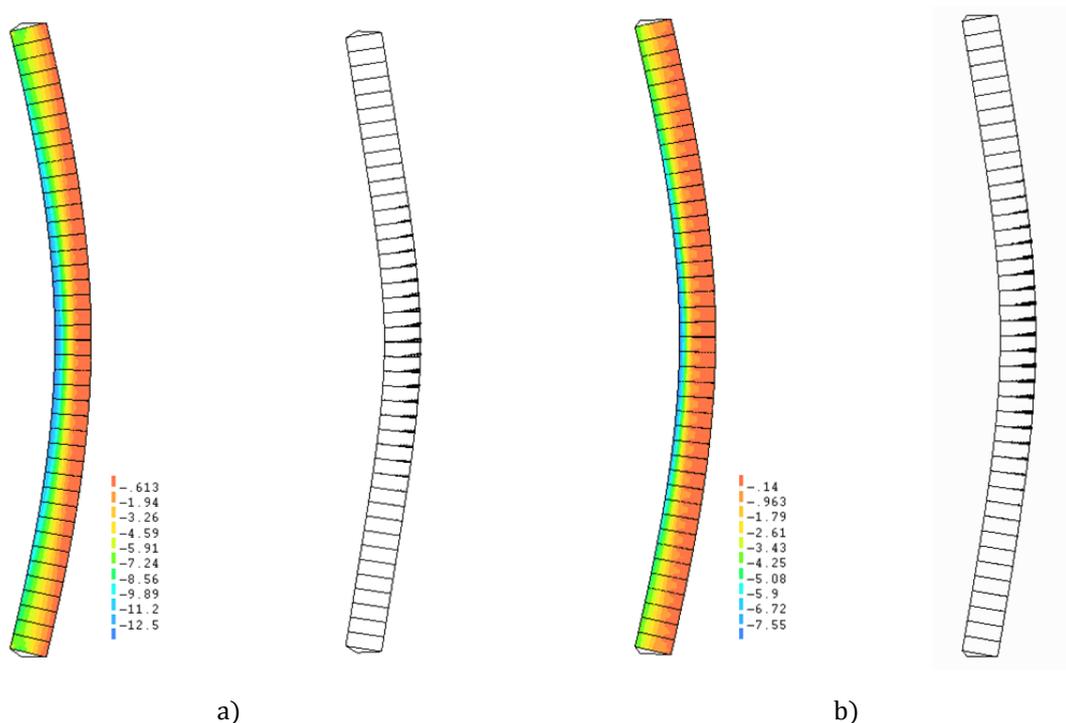


Figura 4.14 – Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y apertura de juntas (interfaces) representadas sobre la forma deformada para el modelo de esbeltez 18.7 y excentricidades a) $e = t/6$, y b) $e = t/3$.

4.3.2. Otras campañas

Una comparación entre resultados experimentales y numéricos, para diferentes campañas experimentales encontradas en la literatura, se presenta a continuación. Los resultados experimentales obtenidos por Kirtschig y Anstötz (1991), Hasan y Hendry (1976) y Watstein y Allen (1970) son reproducidos numéricamente con el objeto de evaluar la capacidad del modelo para predecir la respuesta última reportada en estos trabajos.

Los parámetros elásticos e inelásticos utilizados en los diferentes análisis han sido detallados con anterioridad en el apartado 4.2.3.

4.3.2.1. Simulación de los ensayos de Kirtschig y Anstötz (1991)

La figura 4.15 muestra una comparación entre las tensiones de rotura experimentales y la tensión de colapso obtenida mediante simulación numérica. Como puede observarse, el acuerdo entre la respuesta experimental y numérica es satisfactoria (en la mayoría de los casos, los resultados numéricos quedan contenidos dentro de la dispersión experimental).

El error absoluto promedio entre resultados experimentales y numéricos alcanza el 17.6%. De acuerdo con la excentricidad de la carga, el error absoluto promedio es de 4.5%, 8.3%, 15.8% y 41.2% para los casos $e = 0$, $e = t/8$, $e = t/4$ y $e = t/3$ respectivamente. Caber notar que para el caso $e = t/3$, el error que resulta es elevado debido a que los valores absolutos son muy pequeños.

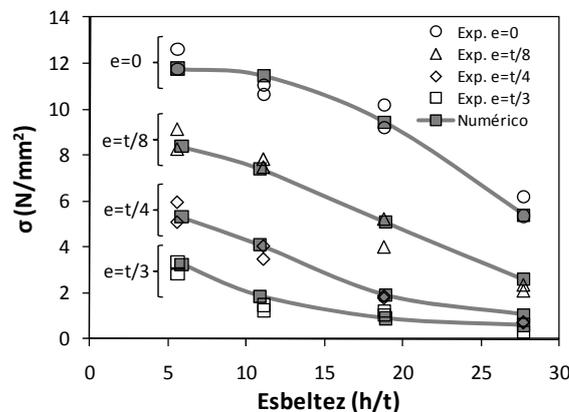


Figura 4.15 – Comparación entre capacidad última numérica y experimental. Campaña experimental de Kirtschig y Anstötz (1991).

Las tensiones principales de compresión [N/mm²], representadas sobre la forma deformada, se muestran a continuación para los diferentes modelos generados. Todas las gráficas corresponden a la condición de rotura (último paso de carga).

Kirtschig y Anstötz (1991) no reporta los modos de rotura experimentales, sin embargo el comportamiento que se observa en los modelos numéricos muestran coincidencia con los modos reportados por otras campañas. Con el aumento de la excentricidad de la carga, el campo de tensiones de compresión en la sección transversal disminuye hasta valores cercanos a la resistencia a tracción en el costado izquierdo.

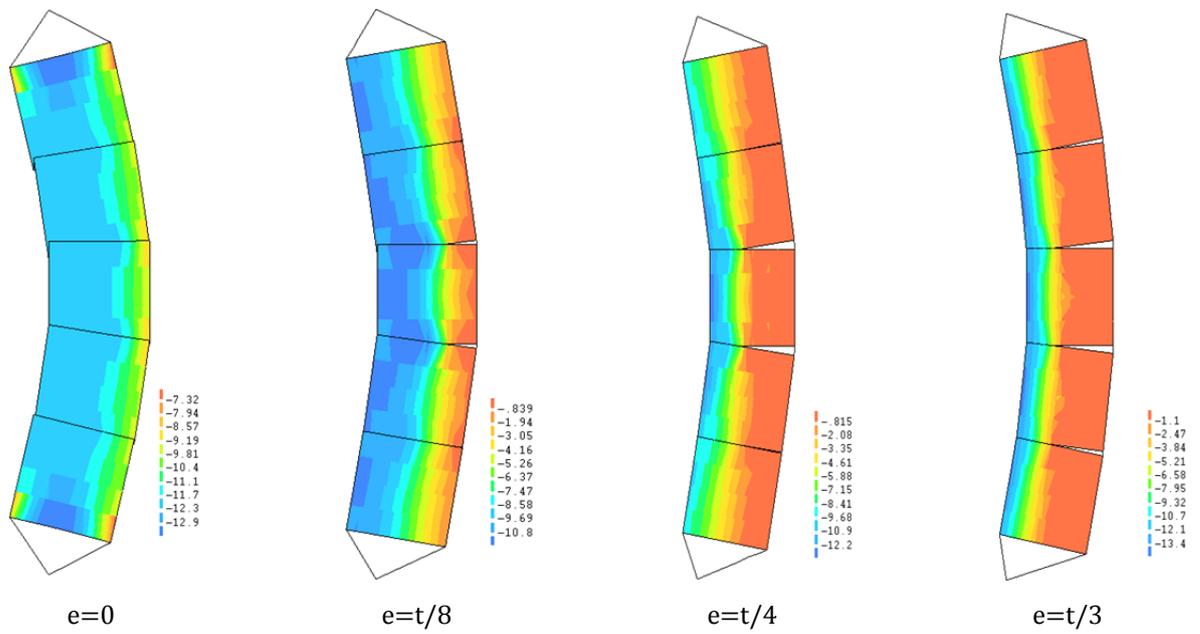


Figura 4.16 - Esbeltez 5.6: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada.

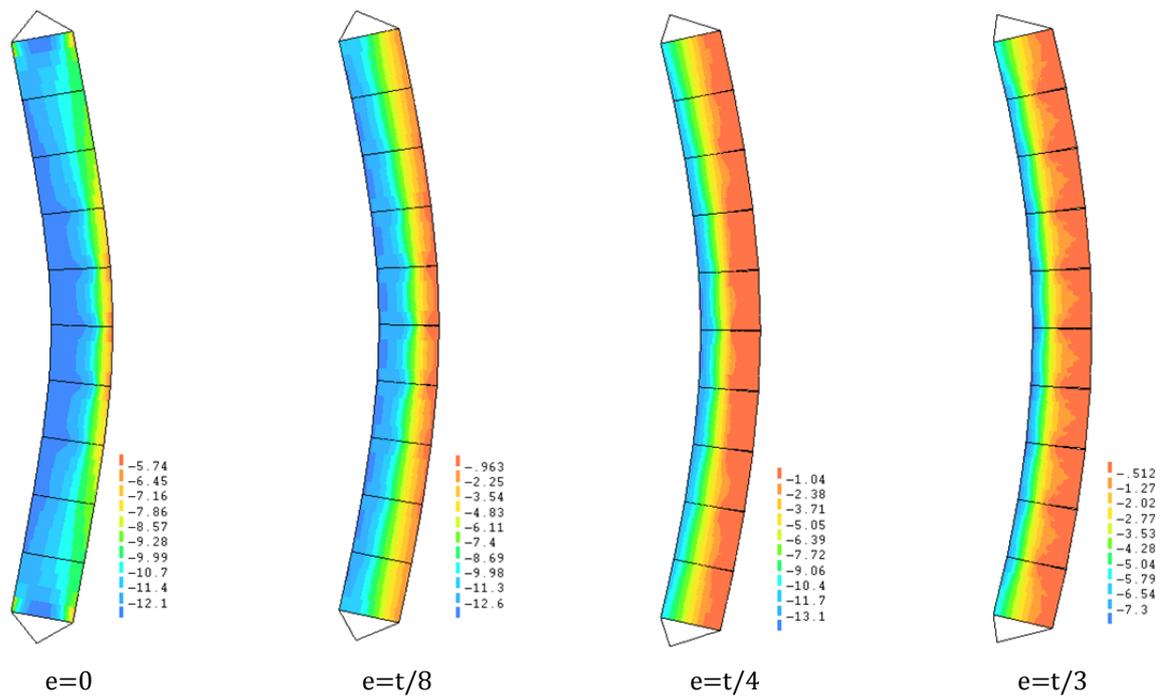


Figura 4.17 - Esbeltez 11.1: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada.

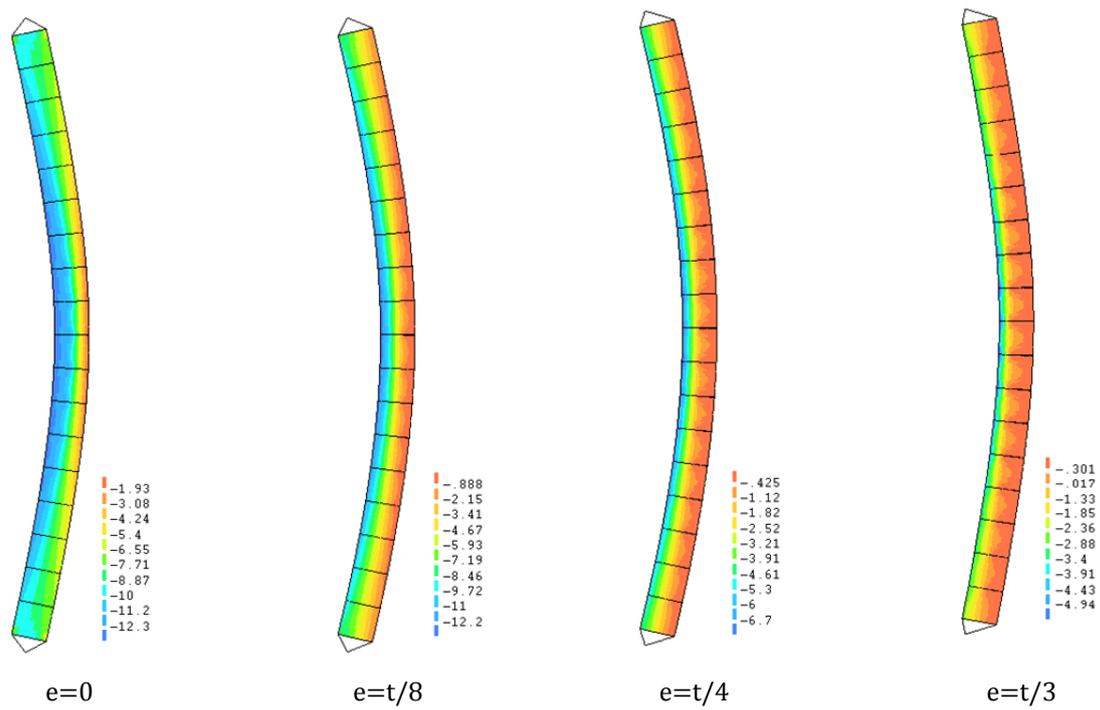


Figura 4.18 - Esbeltez 18.8: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada.

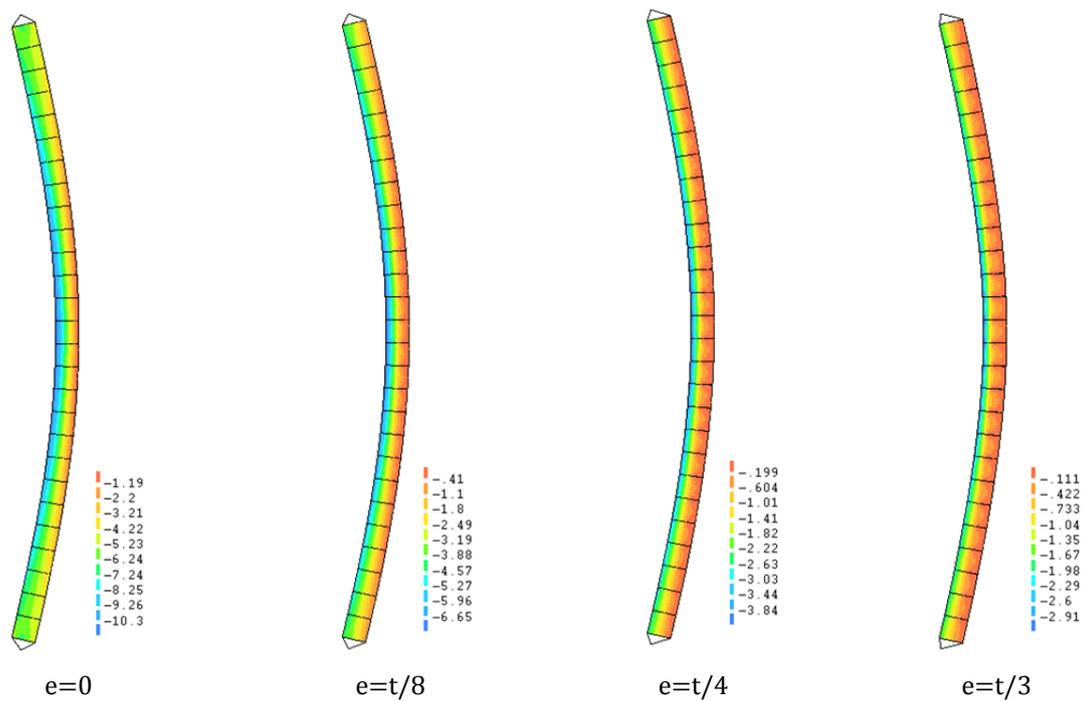


Figura 4.19 - Esbeltez 27.7: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada.

4.3.2.2. Simulación de los ensayos de Hasan y Hendry (1976)

La figura 4.20 muestra la comparación entre las tensiones de rotura experimentales y la tensión de colapso obtenida mediante simulación numérica. Como puede observarse, el acuerdo entre la respuesta experimental y numérica es satisfactoria (en la mayoría de los casos, los resultados numéricos quedan contenidos dentro de la dispersión experimental).

El error absoluto promedio entre resultados experimentales y numéricos alcanza el 8.0%. De acuerdo con la excentricidad de la carga, el error absoluto promedio es de 6.5%, 10.6%, y 6.7% para los casos $e = 0$, $e = t/6$ y $e = t/3$ respectivamente. Las tensiones principales de compresión, representadas sobre la forma deformada, son mostradas en las figuras 4.21, 4.22, 4.23 y 4.24.

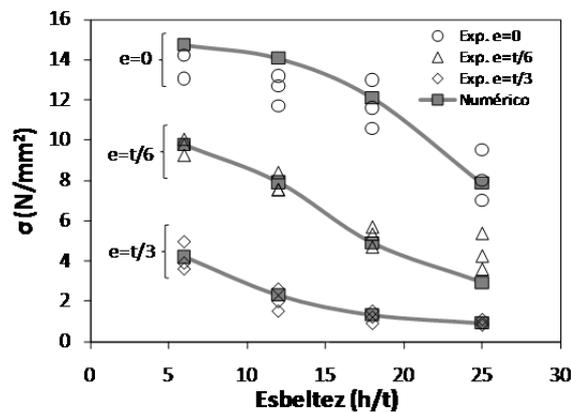


Figura 4.20 - Comparación entre capacidad última numérica y experimental. Campaña experimental de Hasan y Hendry (1976).

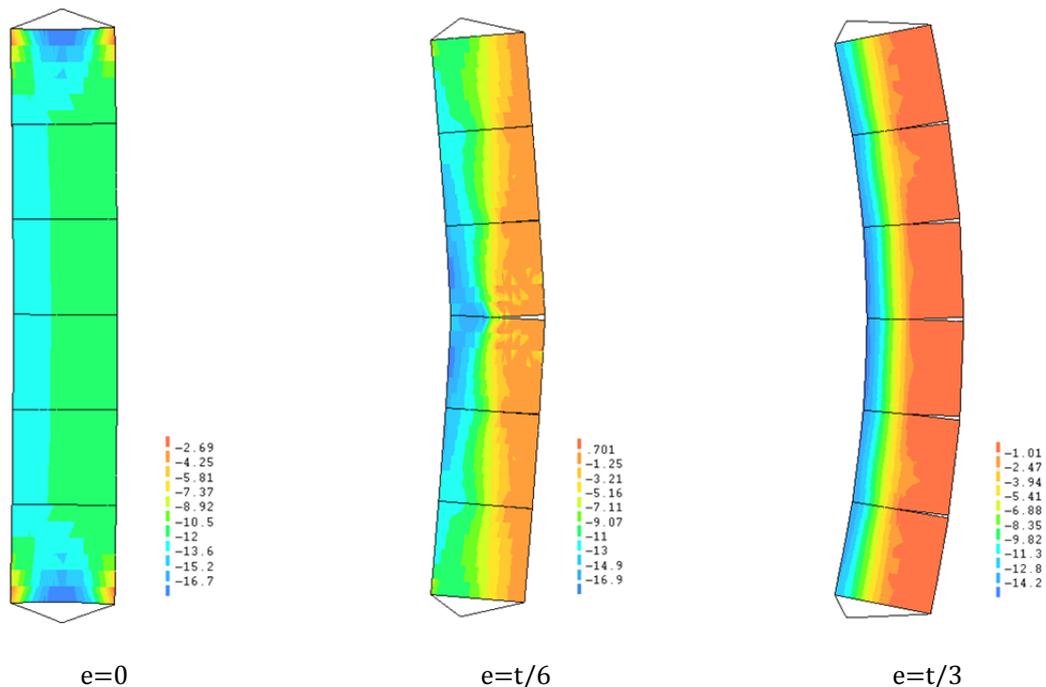


Figura 4.21 - Esbeltez 6: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada.

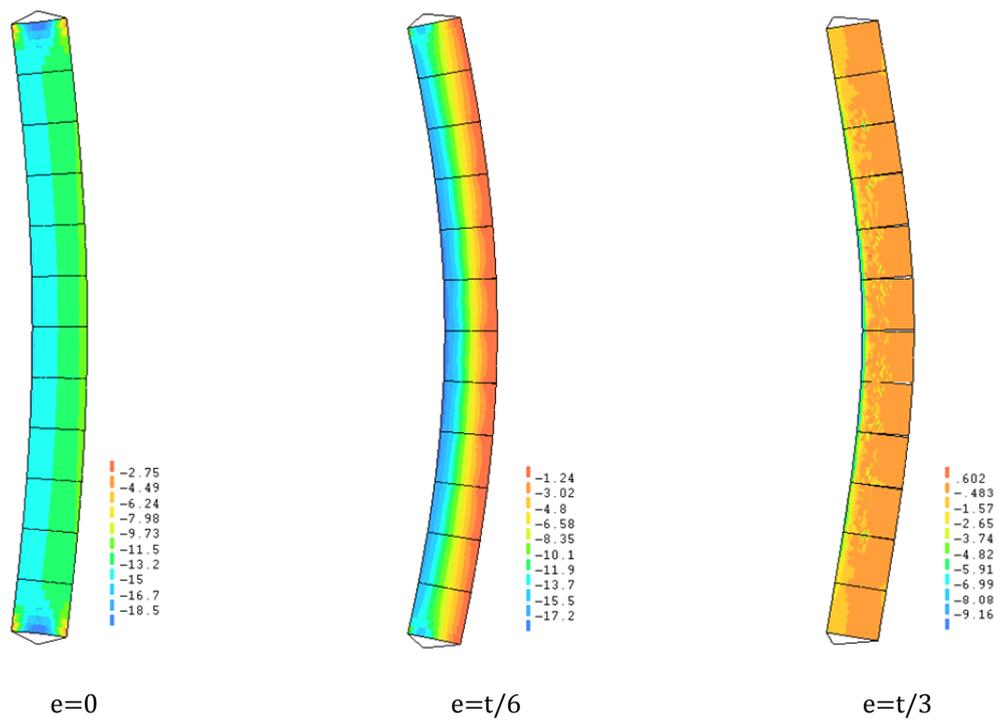


Figura 4.22 - Esbeltez 12: Tensiones principales de compresión $[N/mm^2]$ en rotura y deformada.

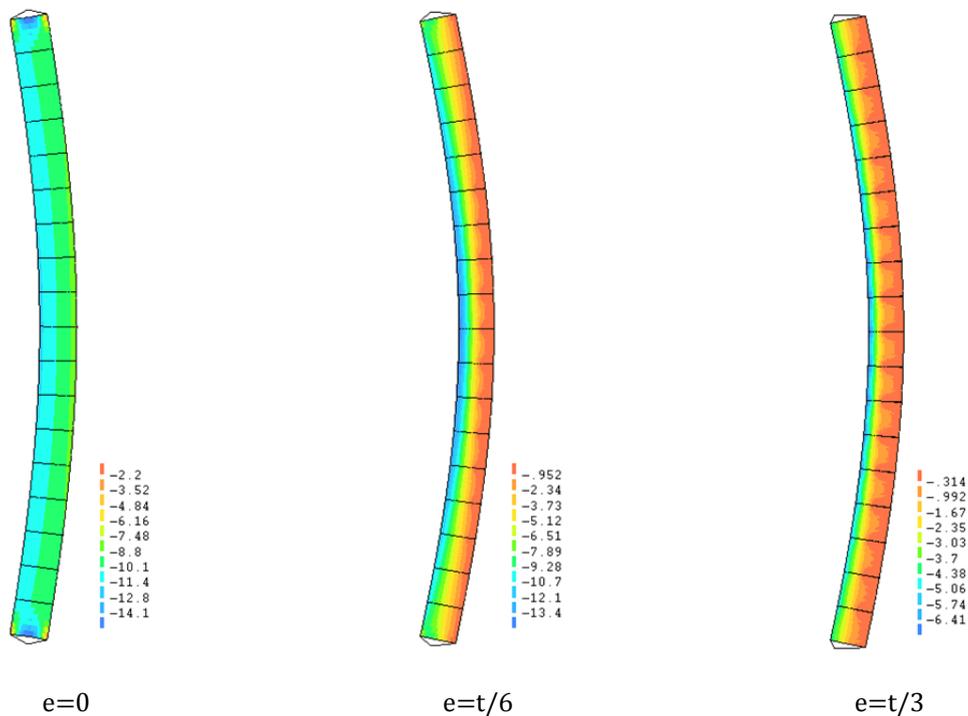


Figura 4.23 - Esbeltez 18: Tensiones principales de compresión $[N/mm^2]$ en rotura y deformada.

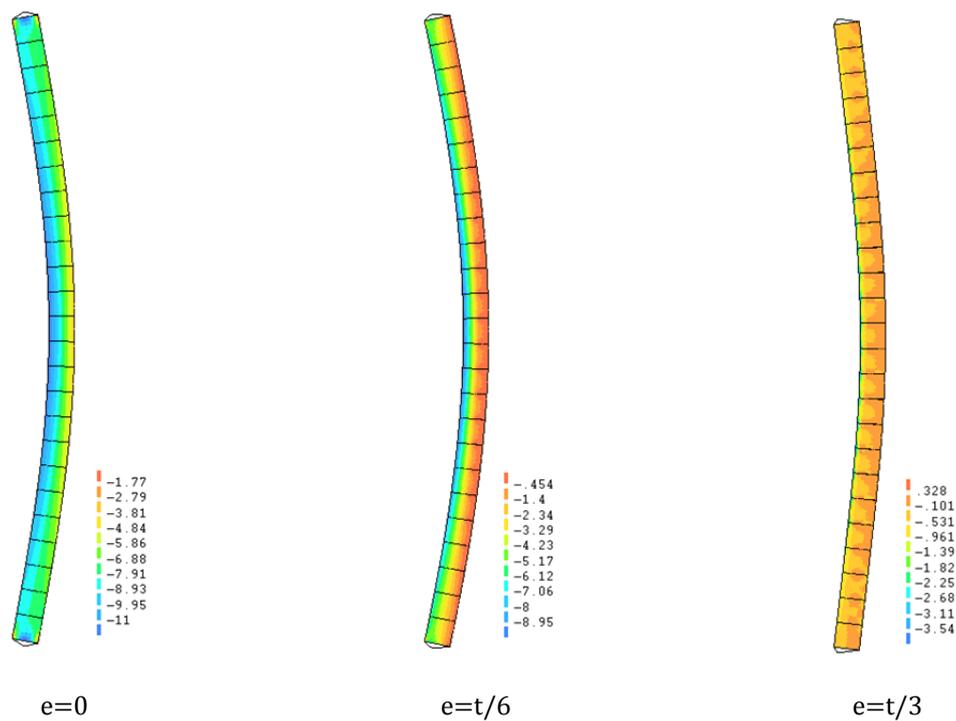


Figura 4.24 - Esbeltez 25: Tensiones principales de compresión $[N/mm^2]$ en rotura y deformada.

4.3.2.3. Simulación de los ensayos de Watstein y Allen (1970)

La figura 4.25 muestra la comparación entre las tensiones de rotura experimentales y la tensión de colapso obtenida mediante simulación numérica. Como puede observarse, la coincidencia entre la respuesta experimental y numérica es satisfactoria (en la mayoría de los casos, los resultados numéricos quedan contenidos dentro de la dispersión experimental).

El error absoluto promedio entre resultados experimentales y numéricos alcanza el 10.5%. De acuerdo con la excentricidad de la carga, el error absoluto promedio es de 16.4%, 11.3%, y 3.9% para los casos $e = 0$, $e = t/6$ y $e = t/3$ respectivamente.

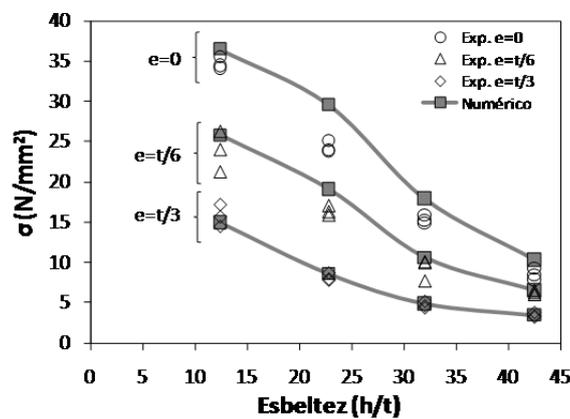


Figura 4.25 - Comparación entre capacidad última numérica y experimental. Campaña experimental de Watstein y Allen (1970).

Las tensiones principales de compresión [N/mm²], representadas sobre la forma deformada, son mostradas a continuación para los diferentes modelos generados:

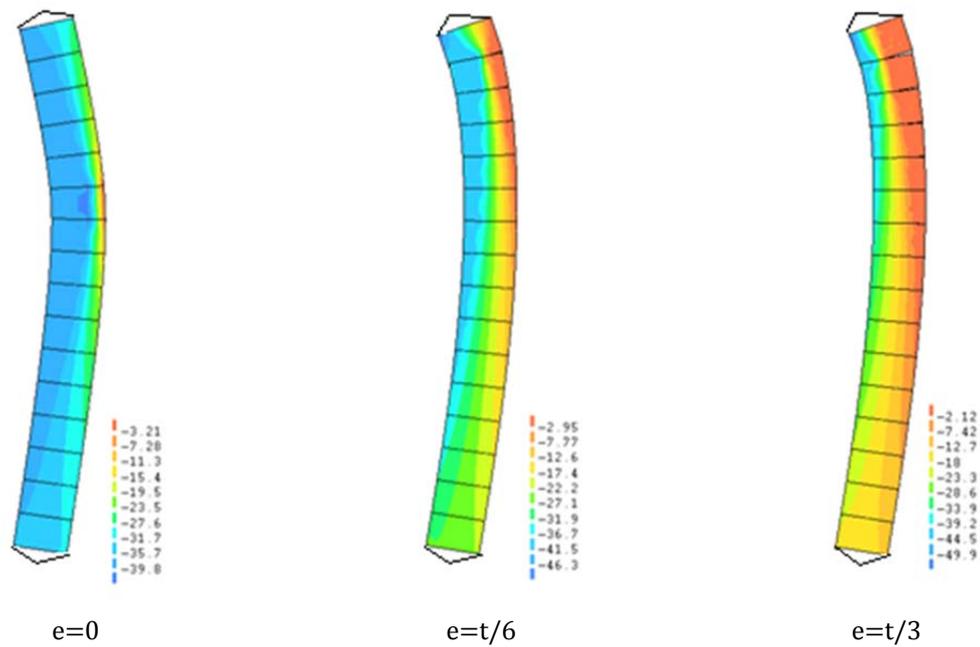


Figura 4.26 - Esbeltez 12.4: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada.

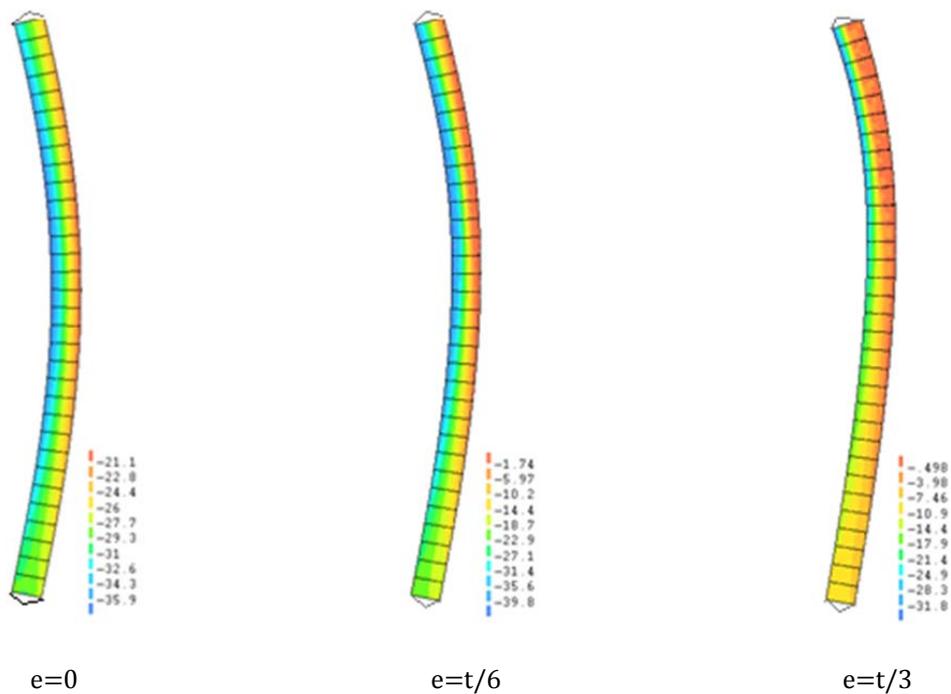


Figura 4.27 - Esbeltez 22.8: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada.

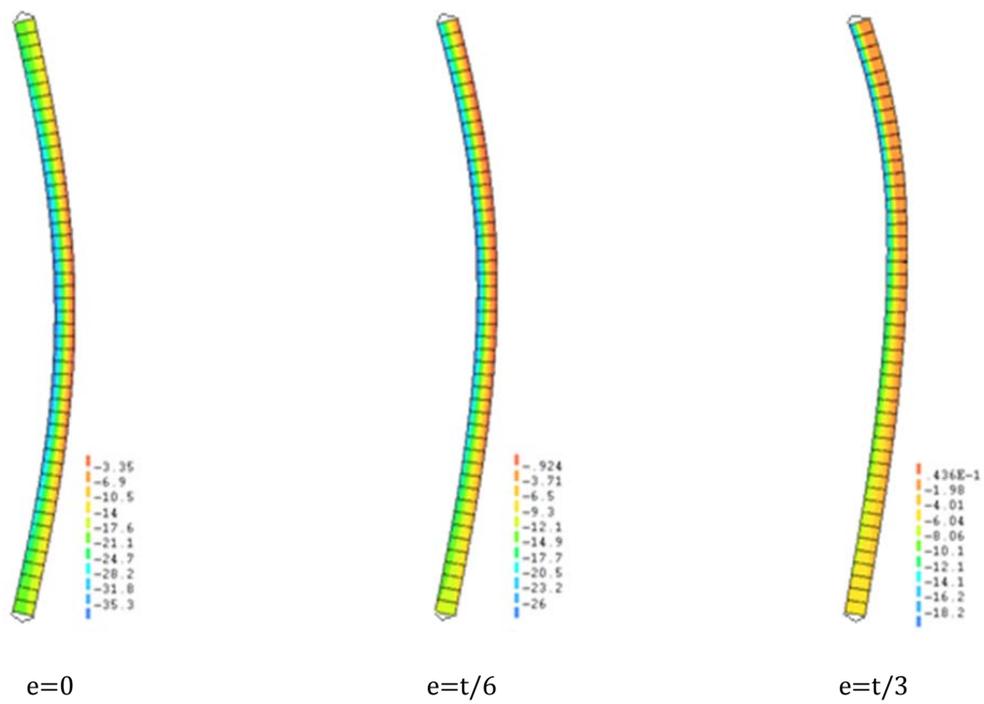


Figura 4.28 - Esbeltez 32.0: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada.

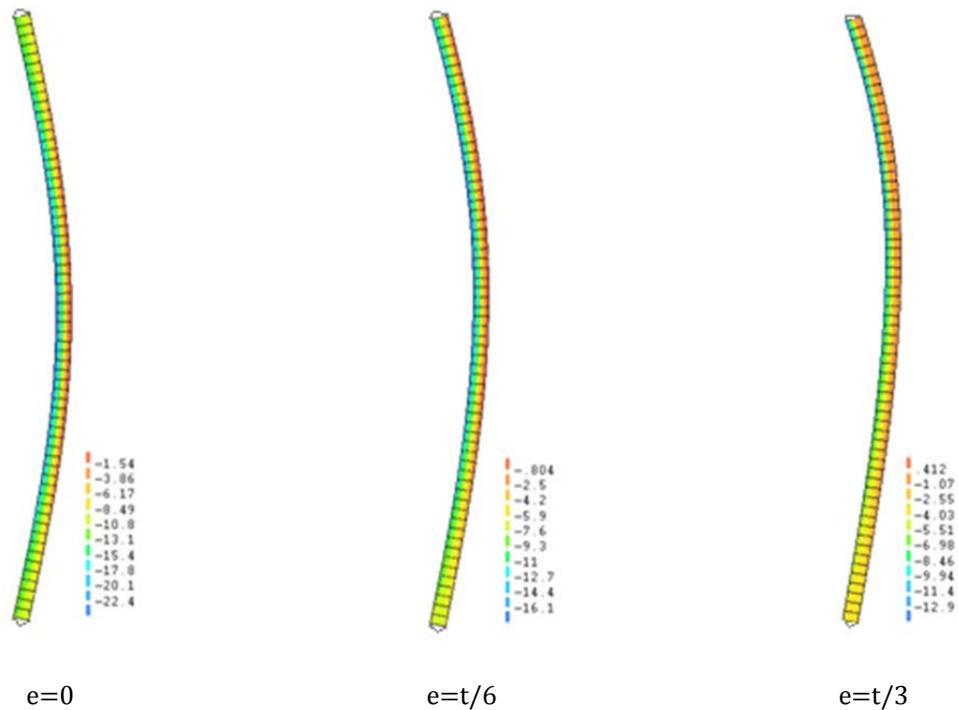


Figura 4.29 - Esbeltez 42.5: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada.

Watstein y Allen (1970) reportaron deflexiones laterales de muros cargados excéntricamente con esbeltez 22.8, 32.0 y 42.5. Una comparación entre el valor promedio de dichas mediciones experimentales y la predicción numérica se ilustra en la figura 4.30. Globalmente, el comportamiento experimental es reproducido satisfactoriamente por el modelo numérico.

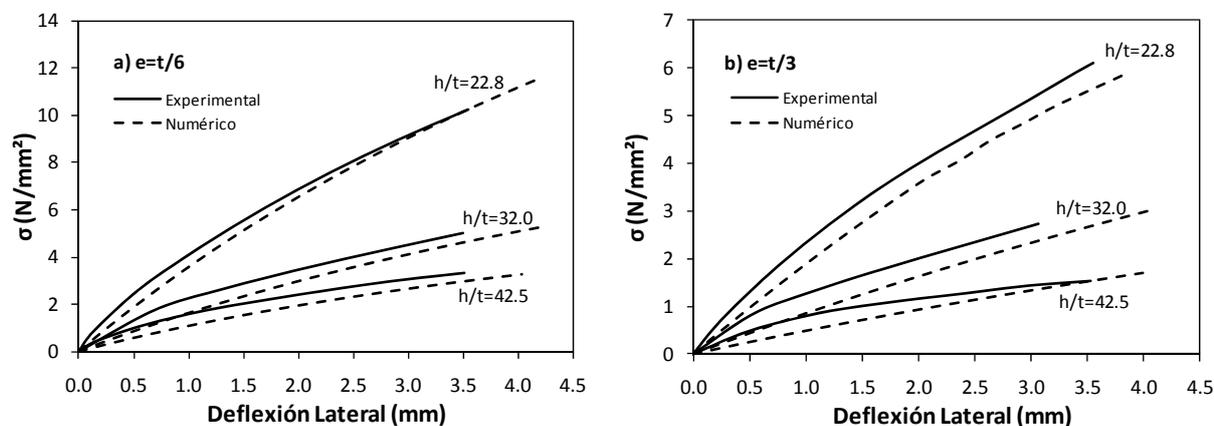


Figura 4.30 – Curvas tensión-deflexión lateral. Comparación entre resultados experimentales y numéricos para Watstein y Allen (1970).

4.4. Discusión

Un conjunto de ensayos experimentales sobre el fallo por pandeo de muros de obra de fábrica han sido simulados numéricamente mediante un micro-modelo simplificado. A pesar de las dificultades e incertidumbres en la caracterización del fenómeno del pandeo, y a la propia complejidad del material, la aplicación numérica es capaz de capturar correctamente el comportamiento experimental observado. En todos los casos analizados, las simulaciones ofrecen una predicción satisfactoria, tanto en términos de capacidad resistente como en términos de deformabilidad lateral y patrón de fisuras. Como ya ha sido comentado, las principales diferencias que se producen al modelar este fenómeno están relacionadas con problemas para generar una condición articulada perfecta (apoyo simple con rotación libre) durante la experimentación y a posibles excentricidades accidentales no reportadas.

En términos globales, el modelo numérico parece sobreestimar ligeramente la tensión de compresión cuando la carga vertical actúa concéntricamente. Este hecho es más notorio para bajas razones de esbeltez. Sin embargo, cuando la excentricidad aumenta, el error promedio decrece, excepto para los resultados obtenidos en la campaña de Kirstchig y Anstötz (1991). Un error absoluto promedio de 12.1% ha sido estimado para todos los análisis realizados. El error absoluto promedio para las diferentes campañas ha sido de 12.5% (presente investigación); 17.6% (Kirstchig y Anstötz, 1991); 8% (Hasan y Hendry, 1976); y 10.5% (Watstein y Allen, 1970). Cabe notar que un error menor en simulaciones de resultados experimentales previos se debió principalmente a que varias propiedades fueron ajustadas con el fin de obtener la mejor calibración posible.

Otra posible estrategia para analizar el problema del pandeo en paredes de obra de fábrica es empleando macro-modelos. Sin embargo, debido a que en esta técnica las fisuras están dispersas en el continuo (es decir, no permite obtener fallos localizados en las juntas de mortero) no ha sido utilizada en estos análisis. Sin embargo, a efectos de comparación, en el anexo A se pueden revisar resultados obtenidos empleando la técnica de macro-modelización sobre los resultados experimentales producidos en la presente investigación.

5

Estudio paramétrico

5.1. Introducción

El modelo de interface compuesta propuesto por Lourenço y Rots (1997) ha mostrado buena capacidad para predecir la respuesta última de muros de obra de fábrica considerando el fallo por pandeo. Esta herramienta, basada en la técnica de micro-modelización, se ha puesto a punto y se ha calibrado satisfactoriamente empleando evidencia experimental aportada por la literatura científica así como por los experimentos realizados en el marco de la presente investigación.

La evidencia documental, experimental y numérica hasta aquí obtenida ha puesto de manifiesto que la razón de esbeltez del elemento, la excentricidad de la carga vertical, el módulo de Young del material compuesto y la resistencia a tracción unidad-mortero son los principales parámetros que controlan el comportamiento frente al pandeo de las paredes de obra de fábrica. No obstante, los estudios que han evaluado su influencia e interacción son escasos y generalmente han sido desarrollados para condiciones de carga y propiedades materiales muy particulares. Por esta razón, parece razonable plantear aquí un amplio estudio paramétrico a través de la utilización sistemática del micro-modelo calibrado anteriormente.

Este estudio paramétrico permitirá, por un lado, extender los resultados obtenidos a una mayor diversidad de situaciones en relación a geometría, propiedades materiales y condiciones de carga y, por otro, investigar la influencia e interacción de los diversos parámetros en la respuesta final.

5.1.1. Objetivos

El desarrollo del presente estudio paramétrico tiene por objetivo principal generar un amplio rango de resultados numéricos incorporando el efecto de los principales parámetros que controlan el comportamiento al pandeo de las paredes de obra de fábrica. Este estudio debe representar la gran diversidad de geometrías, propiedades materiales y condiciones de carga posibles en situaciones prácticas.

En este contexto, se establecen los siguientes objetivos específicos para el presente estudio:

- Definir los rangos de aplicación y los valores asumidos por cada parámetro;
- Definir los parámetros necesarios para el micro-modelo, en acuerdo con los valores materiales adoptados en el estudio paramétrico
- Analizar y determinar la influencia de cada una de las variables sobre la capacidad de carga; y
- Discutir los resultados y tendencias generales y particulares derivados del análisis paramétrico.

5.1.2. Organización del estudio

En la primera parte del estudio se definen los parámetros y sus respectivos rangos de estudio. Esta definición se presenta separadamente en parámetros geométricos y parámetros materiales. De manera conjunta, también son definidos aquellos parámetros necesarios para el correcto funcionamiento del micro-modelo empleado. Para ello se emplean recomendaciones de otros autores o valores típicos reportados en la literatura.

A continuación, en el Apartado 5.3, se analizan los resultados obtenidos. El análisis de cada parámetro se realiza por separado, con el objeto de determinar su influencia sobre la capacidad de carga. Dada la gran cantidad de resultados, éstos se presentan sólo de manera gráfica.

Por último, en el apartado 5.4, se presenta una discusión final que resume los aspectos más relevantes del presente estudio.

5.2. Definición de parámetros

Los parámetros más relevantes en el comportamiento bajo estudio son la razón de esbeltez, la excentricidad de la carga, el módulo elástico del material compuesto y la resistencia a tracción unidad-mortero. Otros parámetros, que también pueden resultar importantes (por ej.: relación alto/ancho de unidades, resistencia a compresión de las unidades, resistencia a compresión del mortero) pueden ser incluidos indirectamente a través de fórmulas que determinen la resistencia a compresión o el módulo elástico del material compuesto.

Cabe notar que el presente estudio paramétrico emplea el modelo numérico calibrado en base a los experimentos realizados en la presente investigación. Por tal motivo, las condiciones geométricas y propiedades materiales asignadas corresponden a los valores utilizados en la puesta a punto del micro-modelo para reproducir dichos resultados. En particular, el espesor de las paredes es 36 mm., altura expandida de las unidades es 15 mm. y la resistencia a compresión de la fábrica $f_c = 14.2 \text{ N/mm}^2$.

5.2.1. Parámetros geométricos

Los parámetros geométricos considerados en el presente estudio paramétrico son:

- Razón de esbeltez h/t (razón entre la altura efectiva del muro h y el espesor efectivo del muro t)
- Excentricidad de la carga e/t (excentricidad e en proporción al espesor efectivo del muro t)

A fin de determinar el rango de valores bajo estudio para la razón de esbeltez se han tenido en cuenta los factores de reducción por esbeltez y excentricidad propugnados por la normativa europea (EN 1996-1-1:2005) y española (CTE-DB-SE-F, 2007). Estos factores comienzan a mostrar influencia alrededor de la esbeltez 5, y aunque se encuentran graficados hasta una esbeltez igual a 30, ambos códigos establecen que la razón de esbeltez no será mayor que 27. Por tanto, parece razonable plantear un rango de valores con una razón mínima igual a 5 y una razón máxima igual a 27. Sin embargo, en virtud de facilitar futuros ajustes de una formulación simplificada, se ha extendido el límite superior de estudio a una razón igual a 33. La figura 5.1 muestra, de manera esquemática, las razones de esbeltez consideradas en este estudio, así como el número de piezas necesarias para su correcta reproducción geométrica.

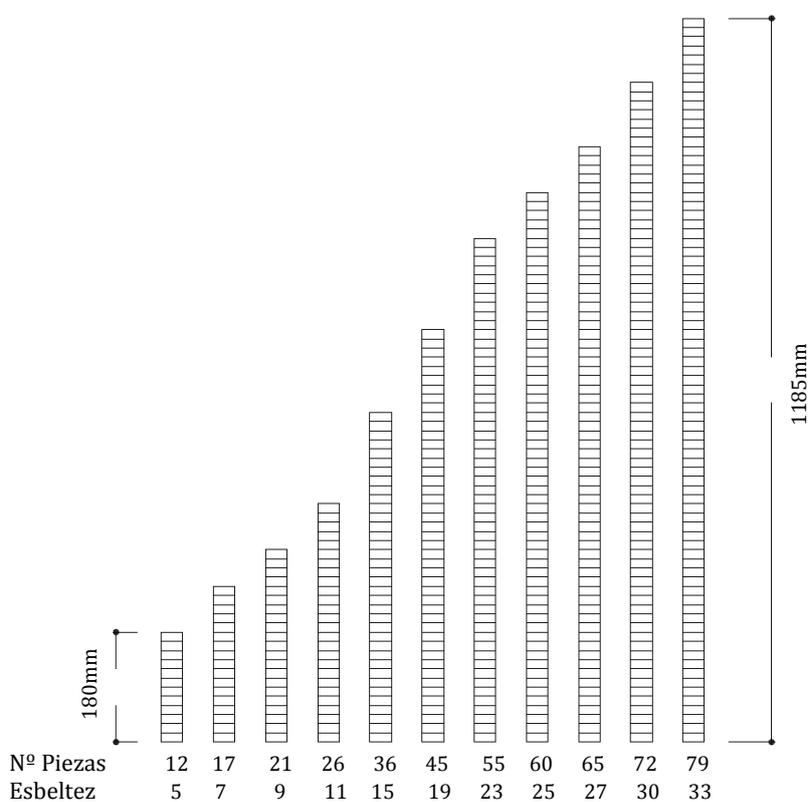


Figura 5.1 – Razones de esbeltez consideradas en el estudio paramétrico

Con respecto a la excentricidad de la carga, se ha propuesto estudiar un rango de condiciones similar al dispuesto en EN 1996-1-1:2005 para el quinto central de la altura del muro, esto es, $0.05t \leq e \leq 0.33t$. Así, los valores de excentricidad considerados en el presente estudio son: excentricidad nula (0.1 mm.), y 10%, 20% y 33% del espesor del elemento. La materialización de estas excentricidades se logra a través de un elemento triangular rígido ubicado en la base y en la cima de cada modelo. La figura 5.2 muestra esta materialización. En cada esquema, el vértice extremo del triángulo tiene libre rotación y es el punto de aplicación de la carga. De esta manera se concreta un sistema bi-articulado con idéntica excentricidad superior e inferior.

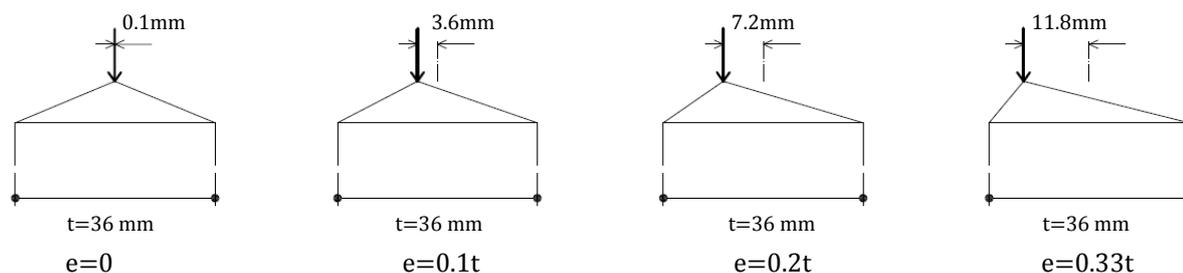


Figura 5.2 - Excentricidades consideradas en el estudio paramétrico

5.2.2. Parámetros materiales

Los parámetros materiales considerados en el presente estudio paramétrico son:

- Módulo elástico de la obra de fábrica como proporción de la resistencia a compresión E/f_c
- Resistencia a tracción de la obra de fábrica como proporción de la resistencia a compresión f_t/f_c

La utilización de estos parámetros en términos adimensionales (E/f_c y f_t/f_c) es a menudo ventajosa por simplicidad y por las mínimas necesidades de cálculo que exige su utilización en situaciones de diseño y comprobaciones prácticas. Además, con frecuencia, técnicos y especialistas utilizan multitud de relaciones directas del tipo $E = 1000f_c$ o $f_t = 0.02f_c$ para estimar estos parámetros.

Como fue comentado anteriormente, la razón entre el módulo elástico y la resistencia a compresión de la fábrica E/f_c podría estar contenida en un amplio rango de valores. De este conjunto, los valores usuales reportados en la literatura para fábrica de ladrillo podrían estar contenidos en su gran mayoría entre los valores 300 y 700. A modo de ejemplo, Kaushik et al. (2007) sugiere una relación promedio de $E \approx 550f_c$. Con anterioridad también ha sido comentado que la razón propuesta por EN 1996-1-1:2005 ($E = 1000f_c$) parece ser excesiva, particularmente para construcciones antiguas de obra de fábrica. Sin embargo, como los resultados de este estudio serán empleados para generar una formulación simplificada aplicable a una gran variedad de casos, el rango de estudio se ha dispuesto entre una relación mínima igual a 60 y una relación máxima igual a 1480, es decir, $60 \leq E/f_c \leq 1480$.

Como fue comentado en el capítulo anterior, los datos del micro-modelo involucrados en la deformación vertical de un muro son el módulo elástico de las unidades E_b y el valor de la interface de rigidez normal k_n . Por lo tanto, en orden a obtener diversas relaciones de E sobre f_c existen varias combinaciones de E_b y k_n que pueden usarse. Para decidir una posible combinación de estos parámetros, en el presente estudio paramétrico se establece el siguiente criterio:

- i. Se determina la proporción entre los valores de E_b y k_n utilizados en la calibración y puesta a punto del micro-modelo empleado para reproducir los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación ($k_n = 0.583E_b$).
- ii. Se asignan valores a E_b en acuerdo con módulos elásticos reportados usualmente en la literatura para ladrillo macizo de arcilla. El rango comprendió valores entre 960 y 22320 N/mm².
- iii. Se determinan valores para k_n a partir de la proporción dada en i.
- iv. Finalmente, empleando el micro-modelo preparado en el apartado 4.2.3, se llevan a cabo análisis para estimar la relación E/f_c numérica a partir de la curva tensión-deformación resultante.

La tabla 5.1 resume los valores asignados a E_b y k_n , así como la relación numérica E/f_c obtenida luego de cada análisis. Cabe notar que esta relación numérica equivalente será con la cual se trabajará en las diversas etapas posteriores del estudio paramétrico (los resultados harán mención a estas relaciones en los siguientes apartados).

Tabla 5.1 – Valores asignados a E_b y k_n ; y relación E/f_c numérica

E_b (N/mm ²)	K_n (N/mm ³)	E/f_c (-)
960	560	60
1680	980	112
2400	1400	160
3360	1960	215
4080	2380	251
4800	2800	320
5760	3360	380
6720	3920	440
8400	4900	550
10080	5880	650
13920	8120	900
18000	10500	1200
19920	11620	1320
22320	13020	1480

En relación a la resistencia a tracción (f_t), los valores usualmente reportados en la literatura indican que la fábrica podría resistir tensiones de tracción de hasta un 10% de la resistencia a compresión, aunque la fábrica de ladrillo difícilmente alcanza resistencias a tracción tan elevadas (Molins, 1996). Así, la definición de esta variable se ha establecido según se muestra en la tabla 5.2, cuyo valor mínimo es una resistencia a tracción nula y el máximo, el 10% de la resistencia a compresión.

Tabla 5.2 – Valores asignados a f_t

f_t/f_c (-)	f_t (N/mm ²)
0.0%	0.001
2.0%	0.284
4.0%	0.568
6.0%	0.852
8.0%	1.13
10.0%	1.42

5.2.3. Parámetros del modelo de interface compuesta

El modelo de interface compuesta propuesto por Lourenço y Rots (1997) requiere aportar cinco parámetros de resistencia (f_t ; c ; $\tan\phi$; f_c y C_s) y cuatro parámetros inelásticos (G_f^I ; G_f^{II} ; $\tan\psi$ y G_c). A causa de la escasa experimentación sobre pequeños ensamblajes de obra de fábrica, para varios de estos parámetros de entrada solo existe un limitado número de valores disponibles, debidos principalmente a Van der Pluijm (1999). A pesar de ello, varias recomendaciones prácticas para su estimación pueden ser encontradas en Lourenço (1996b) y CUR (1997). Cabe notar que, de acuerdo con Lourenço (1996a), en

general, la mayoría de estos parámetros inelásticos no afectan de manera sensible a los resultados de los análisis.

De todas formas, la utilización sistemática del modelo de interface compuesta en un estudio paramétrico requiere especificar algunos de estos parámetros producto de las propias limitaciones del modelo y en otras ocasiones para mantener una cierta proporción con aquellos parámetros materiales que forman parte del estudio paramétrico. En particular, aquellos parámetros asociados a los modos de fallo por tracción y por compresión.

Modo en Tracción

Como fue observado en el apartado 4.2.1., los parámetros que definen el modo de fallo por tracción son la resistencia a tracción y la energía de fractura en modo I (G_f^I). Los valores de resistencia a tracción parte de este estudio paramétrico han sido definidos en la tabla 5.2, con lo cual resta definir su energía de fractura asociada.

Los resultados reportados por CUR (1997) y Van der Pluijm (1999) indican que no hay una correlación clara entre resistencia a tracción y energía de fractura, aunque la tendencia indica que con el incremento de la resistencia aumenta la energía de fractura. Por consiguiente, y solo para propósitos de la presente investigación, la energía de fractura en modo I se ha estimado como el 10% de la resistencia a tracción.

Modo en Corte

Aunque el fallo por corte no presenta influencia en el problema de estabilidad de paredes, los parámetros involucrados en este modo de fallo deben ser definidos adecuadamente para el buen funcionamiento del modelo. Esto se debe a que el modelo de interface compuesta establece una relación entre el criterio de tracción y el criterio de corte que establece un límite para el valor de resistencia a tracción utilizado en los análisis (ecuación 4.4 – apartado 4.2.3.). Por tanto, los parámetros $\tan\phi$ y c deben ser estimados de tal forma que puedan satisfacer los valores de f_t definidos en la tabla 5.2.

De acuerdo con Viviescas (2009), el ángulo de fricción ($\tan\phi$) presenta una mayor influencia en la respuesta numérica de un muro de corte en comparación a la influencia mostrada por la cohesión (c). Por este motivo, para todos los análisis llevados a cabo la cohesión se mantuvo en un valor constante de $c = 0.45 \text{ N/mm}^2$, que corresponde al valor experimental reportado por Lobato (2009) para fábrica construida con unidades de ladrillo y micro-mortero similares a los utilizados en la presente investigación. La tabla 5.3 resume los valores adoptados para $\tan\phi$, así como los valores asumidos para la energía de fractura en modo I y II. Este último parámetro se ha estimado como el 10% de la cohesión (Lourenço, 1996b).

Tabla 5.3 – Valores de $\tan\phi$, G_f^I y G_f^{II} adoptados en el estudio paramétrico

f_t (N/mm^2)	$\tan\phi$ (-)	G_f^I (Nmm/mm^2)	G_f^{II} (Nmm/mm^2)
0.001	0.77	0.000	0.045
0.284	0.77	0.028	0.045
0.568	0.77	0.057	0.045
0.852	0.53	0.085	0.045
1.13	0.40	0.113	0.045
1.42	0.32	0.142	0.045

Por último, la tangente de la dilatación ($\tan\psi$) ha tomado un valor prácticamente nulo y constante de 0.009 para todas las simulaciones llevadas a cabo dentro del estudio paramétrico.

Modo en Compresión

Los parámetros necesarios para definir el *cap model* son la resistencia a compresión de la fábrica f_c , la forma de la superficie elíptica dada por C_s , la energía de fractura por compresión G_c y el desplazamiento relativo equivalente κ_p , correspondiente a la resistencia a compresión uniaxial.

La resistencia a compresión en todos los modelos numéricos del presente estudio paramétrico se asume constante e igual a $f_c = 14.2 \text{ N/mm}^2$. Para los parámetros restantes se han adoptado las sugerencias realizadas por Lourenço (1996b). En particular, en los modelos el parámetro C_s adopta un valor constante de 9.0, mientras que para estimar la energía de fractura en compresión (G_c) se utiliza la ecuación 4.3, descrita en el capítulo 4 (apartado 4.2.3.).

Por último, el parámetro κ_p se estima a partir de la siguiente expresión:

$$\kappa_p = f_c \cdot \left(0.002 - f_c \left(\frac{1}{E_b} - \frac{1}{k_n(h_u + h_j)} \right) \right) \quad [5.1]$$

donde E_b es el módulo elástico de la unidad y k_n la constante de rigidez normal de la interface, mientras que h_u y h_j corresponden a los espesores de la unidad y de la junta de mortero respectivamente.

5.3. Análisis de resultados

La tabla 5.4 resume los valores considerados para cada parámetro adimensional (h/t , e/t , E/f_c , f_t/f_c) en el presente estudio paramétrico. Las diversas combinaciones que se generan dan un total de 3696 casos numéricos. De esta manera, el estudio pretende cubrir un amplio rango de casos en cuanto a geometría (razón de esbeltez), propiedades materiales (rigidez y resistencia a tracción) y condiciones de carga (excentricidad de la carga).

Los análisis han sido realizados utilizando el software DIANA (TNO Diana, 2005) en régimen de no-linealidad geométrica. En orden a obtener una descripción completa de la curva tensión-deformación, se ha empleado control por desplazamiento en todos los análisis.

Debido a la gran cantidad de resultados, éstos son presentados gráficamente y de una manera tal que el comportamiento general observado de acuerdo con cada variable quede suficientemente representado.

La presentación y análisis de los resultados se realiza de acuerdo con cada variable considerada en el estudio. Sin embargo, es importante resaltar que aún cuando se realiza un análisis por separado, las variables en estudio presentan una fuerte interacción entre ellas.

Tabla 5.4 – Estudio paramétrico. Resumen de valores adoptados

Nº	h/t	e/t	E/f_c	f_t/f_c
1	5	0	60	0%
2	7	0.1	112	2%
3	9	0.2	160	4%
4	11	0.33	215	6%
5	15		251	8%
6	19		320	10%
7	23		380	
8	25		440	
9	27		550	
10	30		650	
11	33		900	
12			1200	
13			1320	
14			1480	
Total	11	4	14	6

5.3.1. Influencia de la razón de esbeltez (h/t)

Como ha sido comentado con anterioridad, el aumento de la razón de esbeltez de una pared causa una disminución de su capacidad de carga. Este fenómeno se ve incrementado si la carga se encuentra aplicada con cierta excentricidad. Los resultados del estudio paramétrico reafirman esta tendencia y permiten además establecer conclusiones adicionales acerca de la interacción con las otras variables en estudio.

La figura 5.3 muestra el impacto de la razón de esbeltez sobre la capacidad de carga, en términos de la resistencia normalizada σ/f_c . Cabe notar que esta resistencia normalizada es equivalente al factor de reducción por esbeltez y excentricidad Φ usualmente empleado en métodos de diseño de muros de obra de fábrica. En estas gráficas la resistencia a tracción es nula.

Se puede observar que existe, además de una disminución de la capacidad de carga conforme aumenta la razón de esbeltez, una estrecha dependencia con la relación de E sobre f_c . De hecho, de esta última relación depende la proporción con que la capacidad de carga disminuye.

En este sentido, la figura 5.3 muestra la evolución de las diversas curvas conforme aumenta la relación de E/f_c . Las paredes con baja rigidez (figura 5.3a) presentan una disminución de la capacidad de carga más dramática y pronunciada que aquellas paredes con rigidez más elevada (figura 5.3d). Esta observación es válida para todas las excentricidades en estudio, aunque pareciera ser más notorio en paredes con excentricidad nula. Esto podría deberse principalmente a los modos de rotura predominantes. Mientras para excentricidad nula el modo principal sería por aplastamiento del material, a medida que aumenta la excentricidad, el modo de rotura sería por inestabilidad geométrica (pandeo), no un problema de capacidad portante.

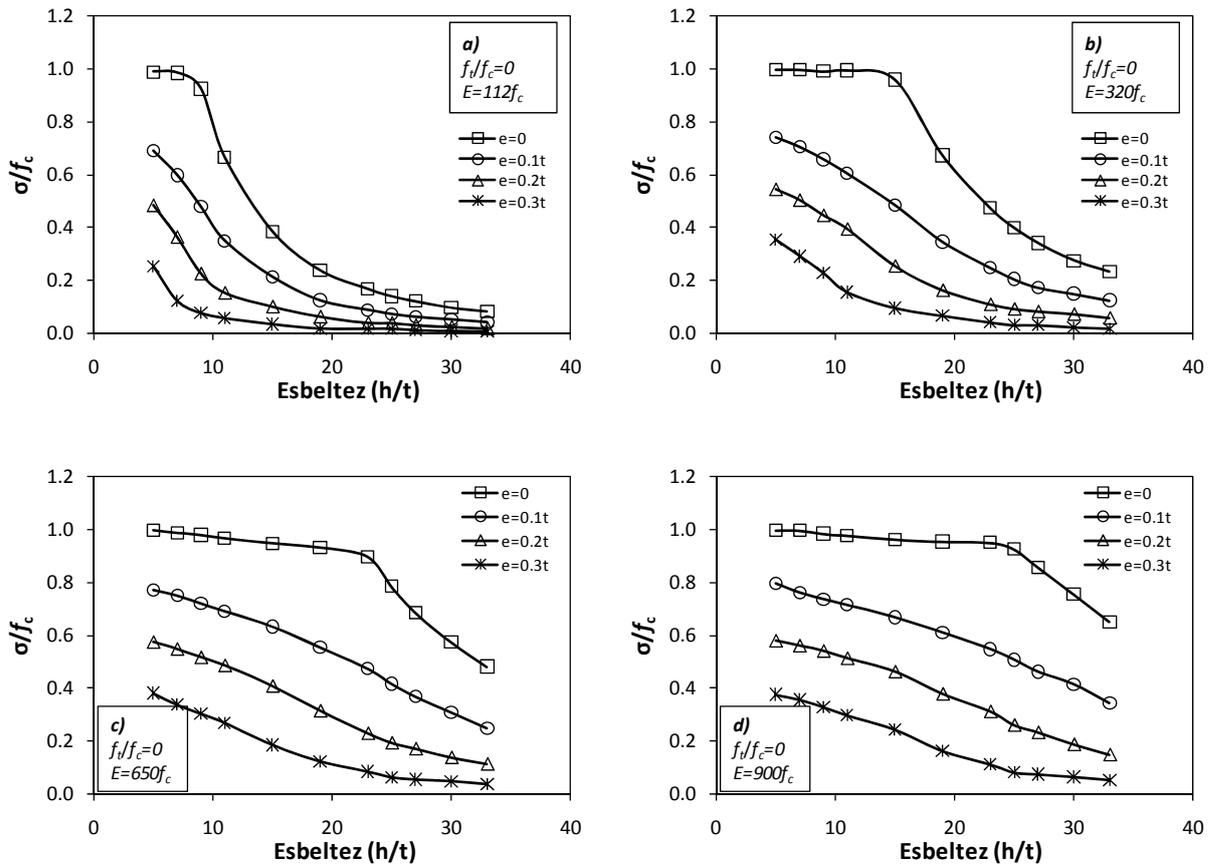


Figura 5.3 – Influencia de la razón de esbeltez sobre la capacidad de carga

5.3.2. Influencia de la rigidez (E/f_c)

La influencia del módulo de Young sobre la capacidad de carga puede observarse en el conjunto de curvas que se presenta en la figura 5.4. Como ha sido comentado con anterioridad, el efecto de la relación E/f_c está principalmente relacionado con la proporción en que disminuye o aumenta la capacidad de carga, conforme este parámetro varía.

La figura 5.4 presenta curvas de resultados correspondientes a cuatro razones de esbeltez (7, 15, 23 y 27). En ellas puede apreciarse el efecto de la relación E/f_c para distintas excentricidades. La resistencia a tracción se ha mantenido constante (2% de la resistencia a compresión) ya que su influencia, aunque significativa, no resulta apreciable en estas curvas.

Puede apreciarse que, para bajas relaciones de esbeltez (figura 5.4a), la capacidad de carga se observa prácticamente constante e indiferente al valor de la relación E/f_c cuando la excentricidad de la carga es nula, a excepción de aquellos muros con relaciones de E/f_c inferiores a ± 100 . En el contexto de las demás excentricidades de la figura 5.4a, el comportamiento es relativamente similar excepto porque el punto de inflexión aumenta en el eje x a valores de ± 150 ; ± 200 y ± 250 , para excentricidades de $0.1t$, $0.2t$ y $0.3t$, respectivamente. En el resto de gráficas, conforme aumenta la esbeltez, el desarrollo de las curvas ocurre del mismo modo. La diferencia que tiene lugar radica en el punto de inflexión de cada curva, que se va desplazando hacia la derecha en el eje x para una misma excentricidad. Este comportamiento es más

evidente, como ya fue comentado, para excentricidad nula, en cuyos casos la rigidez tendría mayor importancia debido al modo de rotura principal por aplastamiento.

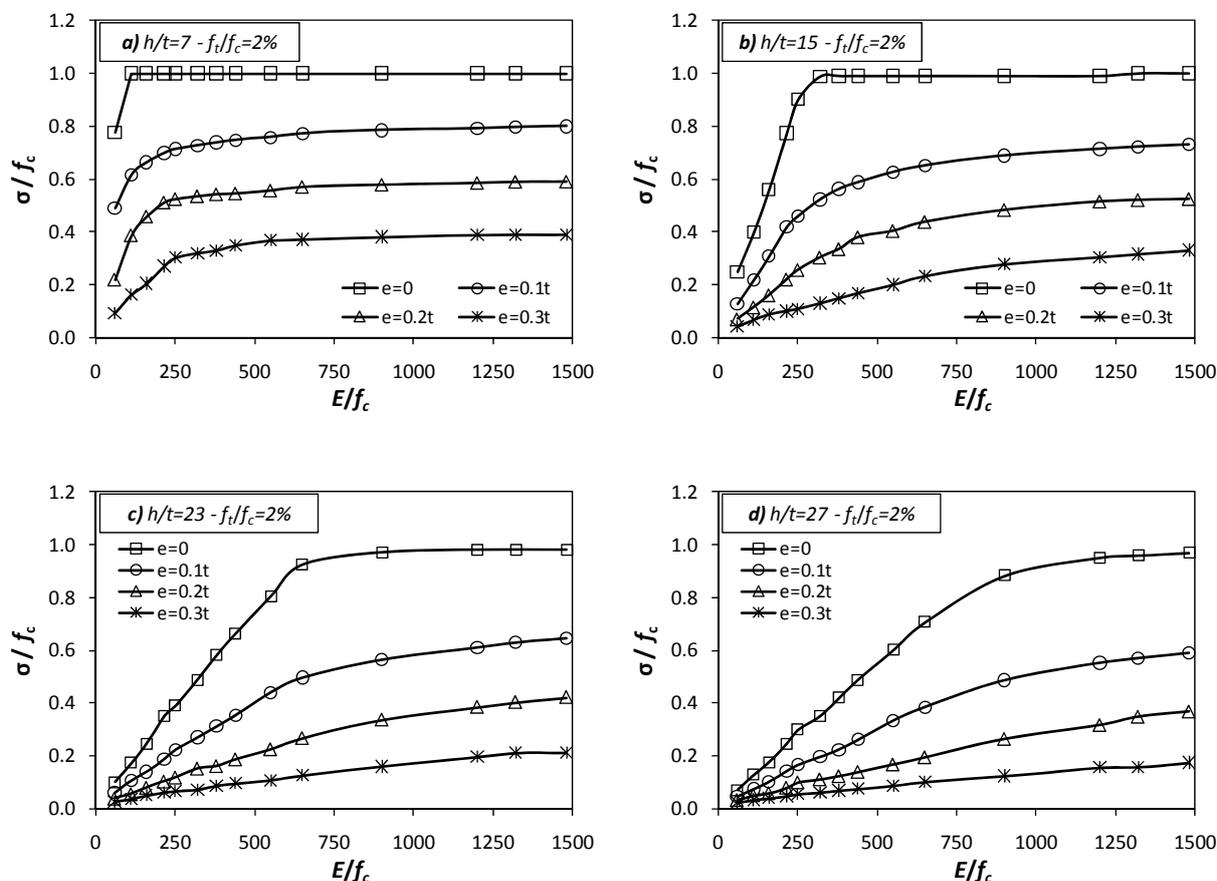


Figura 5.4 - Influencia de la relación E/f_c sobre la capacidad de carga

Las figuras 5.3 y 5.4 muestran una tendencia similar entre curvas con igual excentricidad, que parece variar con la esbeltez y la rigidez. Esta tendencia solo se ve modificada por la ubicación de los puntos de inflexión en cada curva. En la figura 5.3, el cambio de pendiente se va desplazando hacia una esbeltez cada vez mayor conforme aumenta la relación E/f_c . Este comportamiento se confirma en las gráficas de la figura 5.4.

El comportamiento descrito anteriormente permite introducir el parámetro adimensional $\bar{\lambda}$, que relaciona la rigidez con la razón de esbeltez como:

$$\bar{\lambda} = \frac{h}{t} \sqrt{\frac{f_c}{E}} \quad [5.2]$$

Este parámetro adimensional ha sido propuesto originalmente por Sahlin (1959) y empleado posteriormente en formulaciones analíticas desarrolladas por Lewicki (1962, citado por Cassinello, 1964; Kukulski y Lugez, 1966), Kukulski y Lugez (1966) y Turkstra (1970), entre otros.

Las gráficas mostradas en las figuras 5.3 y 5.4, junto con aquellas correspondientes a las distintas relaciones de E/f_c consideradas en el presente estudio paramétrico, pueden ser representadas en función del parámetro $\bar{\lambda}$, de acuerdo con cada excentricidad.

De este modo, la figura 5.5 muestra la relación que existe entre la tensión de compresión normalizada y el parámetro $\bar{\lambda}$, para casos con resistencia a tracción nula. La completa superposición de todas las curvas resulta evidente, por lo que podría suponerse que la capacidad de carga de una pared de obra de fábrica podría ser función, además de la excentricidad de la carga, de un único parámetro adimensional que relacione esbeltez y rigidez del elemento. Sin embargo, como se verá en los apartados siguientes, en un análisis realista también debería incluirse la resistencia a tracción de la interface unidad-mortero.

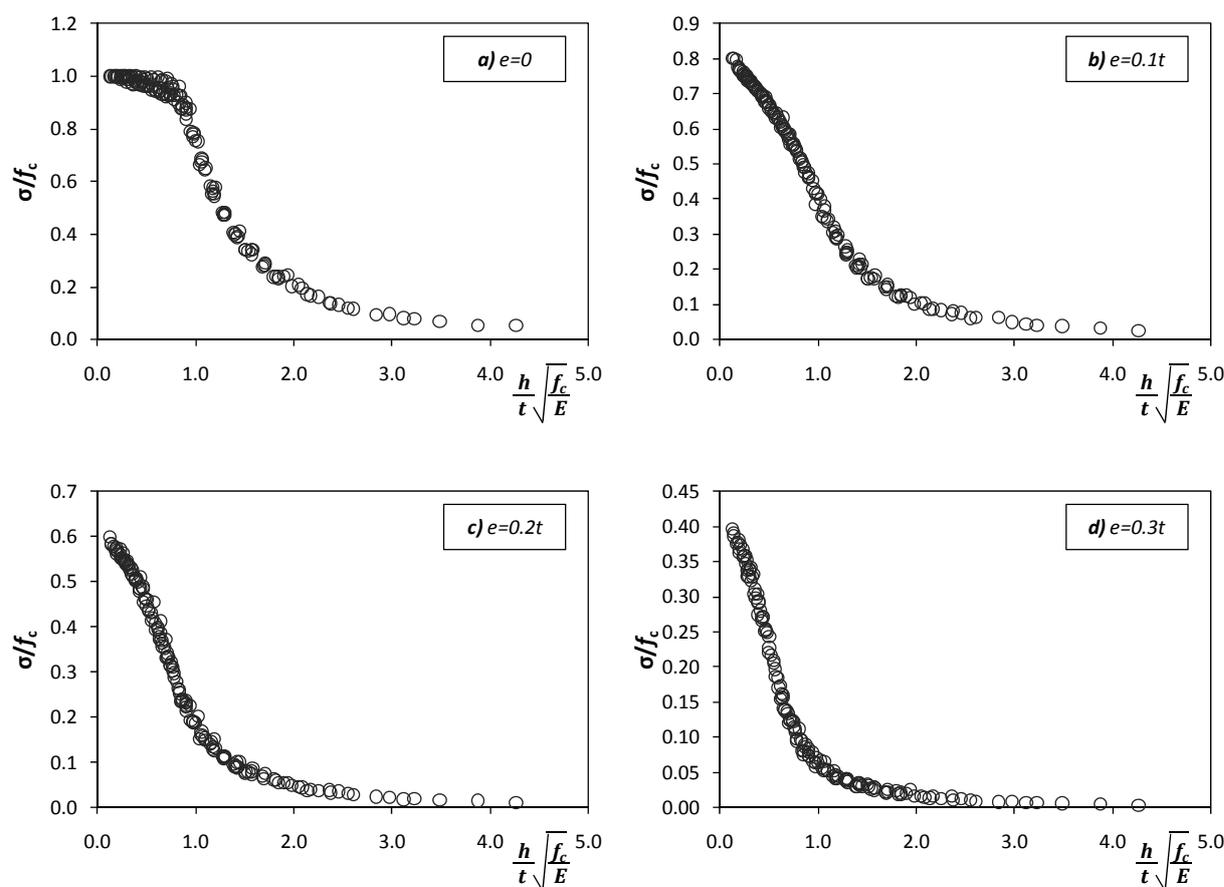


Figura 5.5 - Relación entre la compresión normalizada y el parámetro adimensional $\bar{\lambda}$, para casos con resistencia a tracción nula.

5.3.3. Influencia de la excentricidad de la carga (e/t)

Las figuras 5.6 y 5.7 muestran la tensión crítica adimensional (σ/σ_0) -donde σ_0 corresponde a la tensión para excentricidad nula- como función de la excentricidad de la carga. En las gráficas se puede observar que la excentricidad de la carga vertical juega un importante rol en la determinación de la carga crítica, como es reconocido por la normativa europea (EN 1996-1-1:2005) y española (CTE-DB-SE-F, 2007).

El análisis de resultados se realiza para diversas razones de esbeltez (5, 11, 19 y 27). Asimismo, se han seleccionado resultados para dos relaciones de E/f_c , una relación baja ($E = 215f_c$, figura 5.6) y otra más

elevada ($E = 900f_c$, figura 5.7), con el objetivo de observar cómo influye la interacción entre la rigidez y la excentricidad de la carga sobre la tensión crítica adimensional (σ/σ_0).

En las diversas gráficas se observa que la tensión crítica adimensional -y por tanto la capacidad portante- disminuye con el aumento de la excentricidad de la carga. Esta disminución parece más dramática a medida que aumenta la razón de esbeltez. Cuando la excentricidad e/t aumenta de 0 a 0.3, para $E/f_c=215$ y $h/t=5$, la tensión crítica disminuye de 1 a 0.35, independiente del valor de la resistencia a tracción. Sin embargo, cuando e/t aumenta de 0 a 0.3, para $E/f_c=215$ y $h/t=27$, entonces la tensión crítica disminuye de 1 a 0.41 si $f_t/f_c=10\%$, y hasta 0.09 si $f_t/f_c=0\%$. Del mismo modo, cuando e/t aumenta de 0 a 0.3, para $E/f_c=900$ y $h/t=5$, la tensión crítica disminuye de 1 a 0.41, independiente del valor de la resistencia a tracción. En cambio, cuando e/t aumenta de 0 a 0.3, para $E/f_c=900$ y $h/t=27$, entonces la tensión crítica disminuye de 1 a 0.24 si $f_t/f_c=10\%$, y hasta 0.08 si $f_t/f_c=0\%$.

Globalmente, para elementos de baja esbeltez, la resistencia a tracción pareciera no presentar mayor influencia sobre la tensión crítica y esto sería válido para cualquier relación de E/f_c . Sin embargo, conforme aumenta la esbeltez del elemento, la influencia de la resistencia a tracción se hace más evidente.

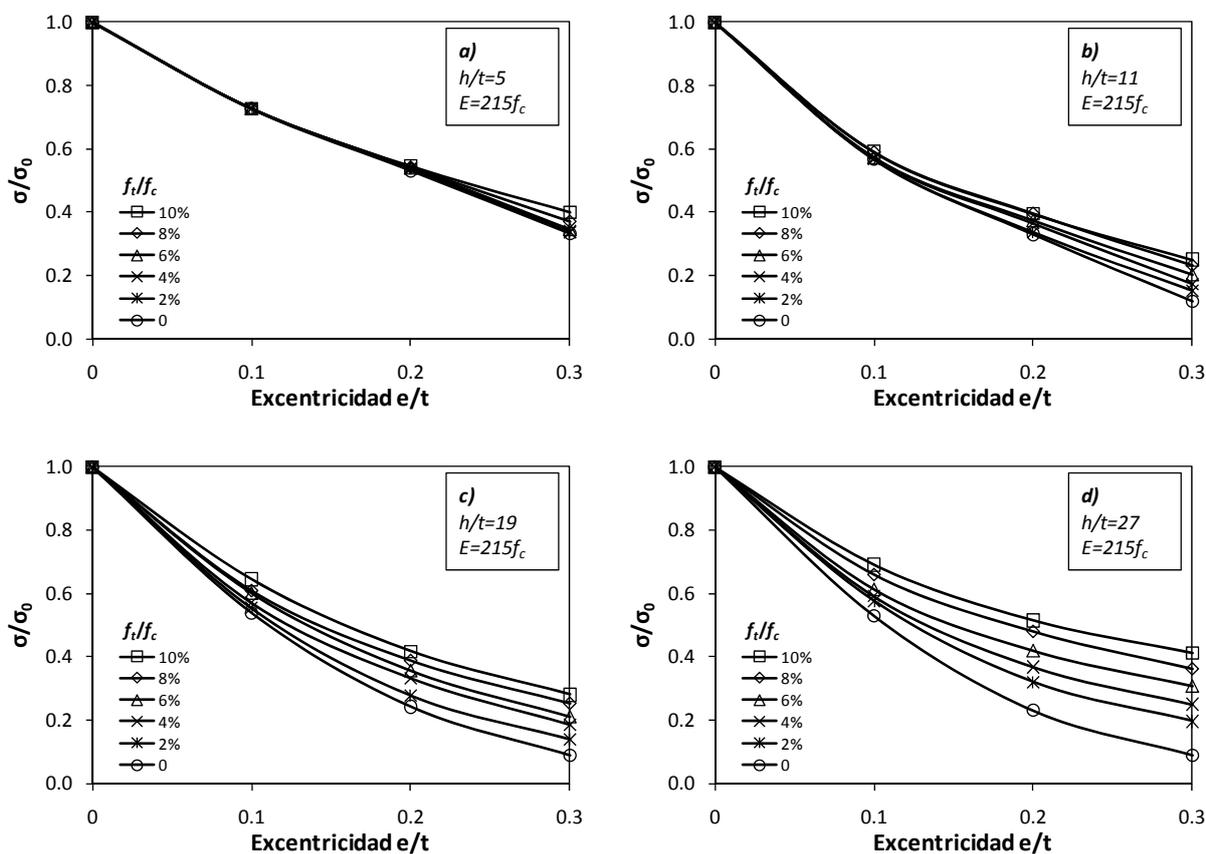


Figura 5.6 - Influencia de la excentricidad de la carga para $E = 215f_c$.

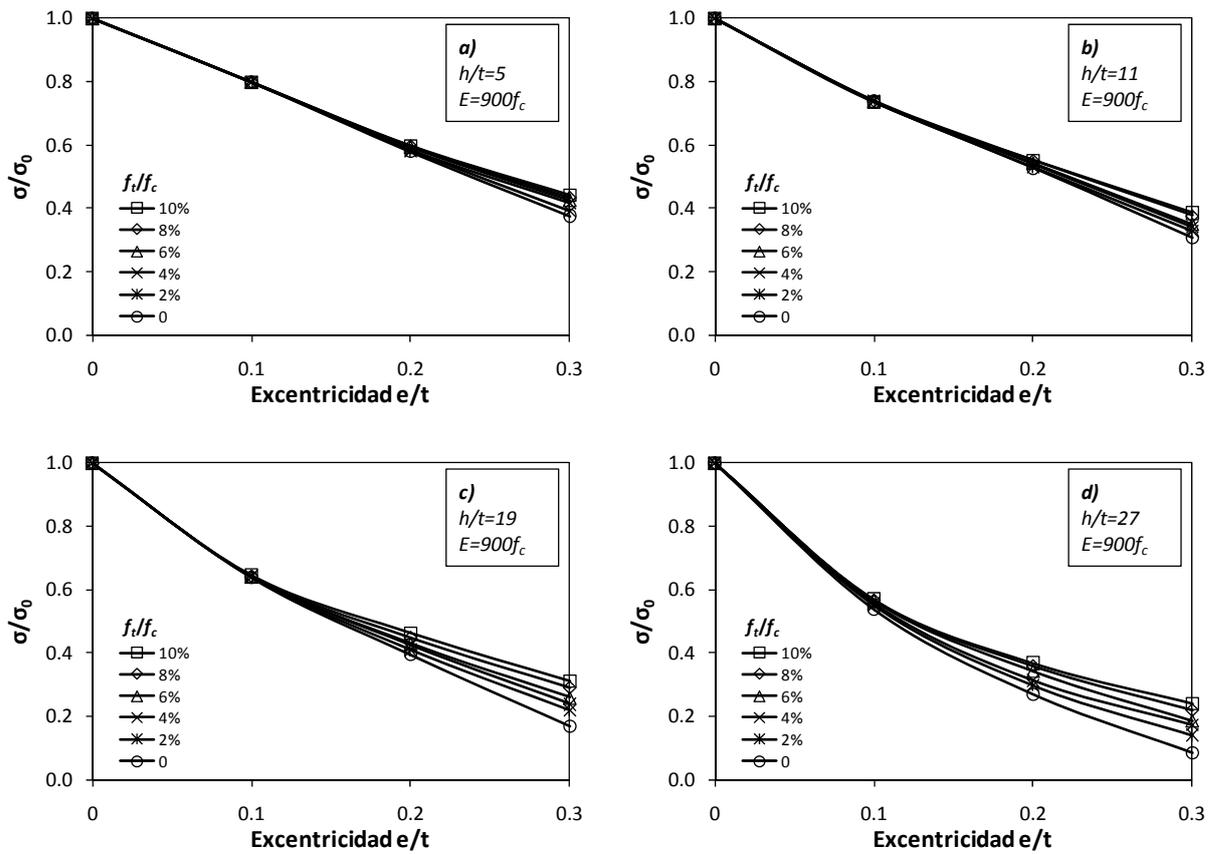


Figura 5.7 - Influencia de la excentricidad de la carga para $E = 900f_c$.

5.3.4. Influencia de la resistencia a tracción (f_t/f_c)

Se ha visto que la resistencia a tracción tiene un notable impacto en la forma de las curvas de capacidad cuando fue analizada la influencia de la excentricidad de la carga. Su importancia crece conforme aumenta la excentricidad y la razón de esbeltez, y disminuye la relación E/f_c del elemento (la resistencia a tracción presenta mayor influencia en elementos con alta deformabilidad, es decir, valores bajos de E/f_c).

La figura 5.8 muestra la tensión de compresión normalizada σ/f_c , para las diversas excentricidades en estudio. El análisis es realizado para varias razones de esbeltez (7, 15, 23 y 27) y una relación constante de $E = 650f_c$. En estas gráficas se puede observar, además del evidente impacto que tiene la excentricidad en la disminución de la capacidad de carga, el significativo rol que tiene la resistencia a tracción conforme aumenta la excentricidad y la esbeltez.

Para elementos con pequeña o nula excentricidad ($e/t < 0.1$), el efecto de la resistencia a tracción sobre la capacidad de carga es prácticamente despreciable. Sin embargo, para casos con grandes excentricidades ($e/t \geq 0.2$), el aumento de la resistencia a tracción mejora sensiblemente la capacidad de carga. Este comportamiento quedó claramente reflejado en las figuras 5.6 y 5.7, analizadas en el apartado anterior.

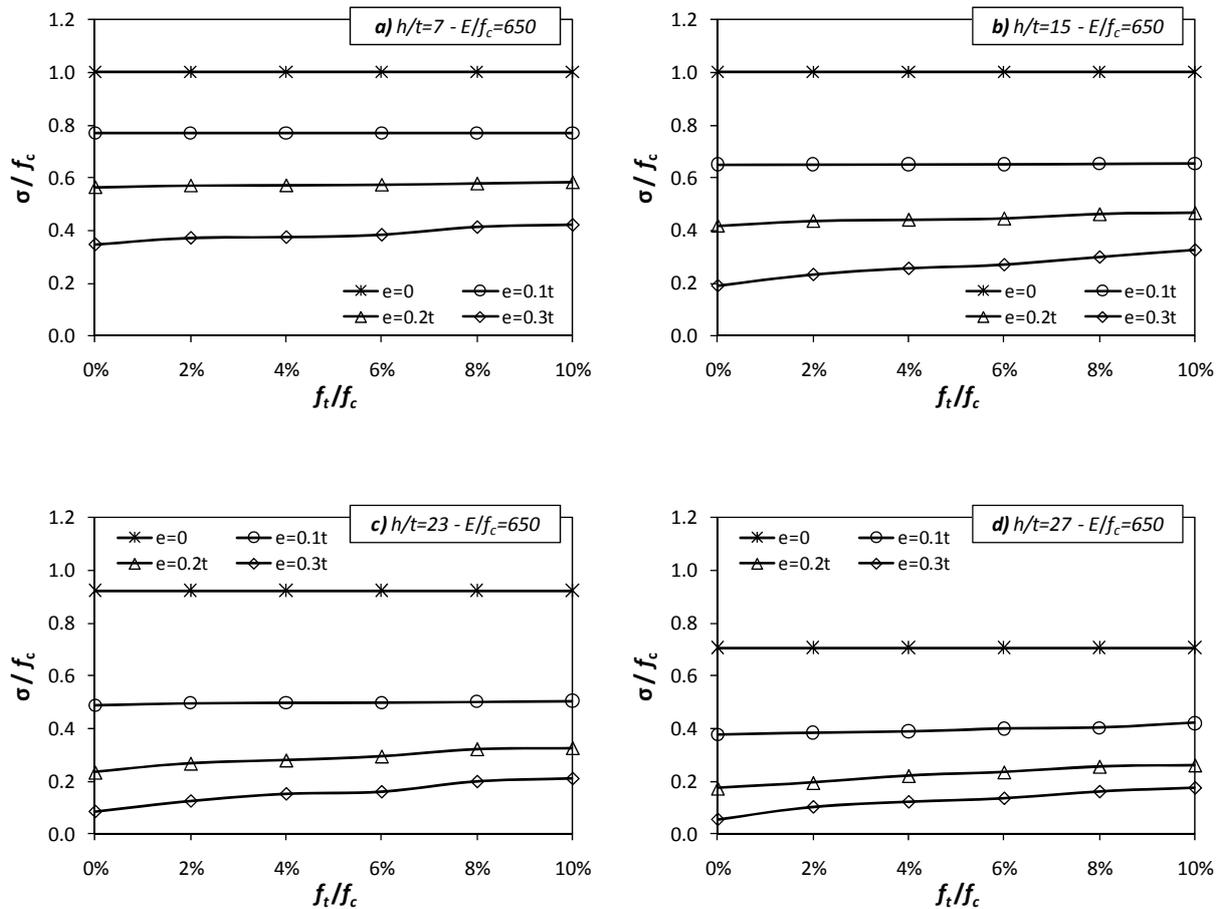


Figura 5.8 – Influencia de la resistencia a tracción sobre la capacidad de carga

En las curvas anteriores también es posible apreciar que para elementos con baja razón de esbeltez (figura 5.8a), la resistencia a tracción muestra ligera contribución en la capacidad de carga solo para casos con gran excentricidad ($e = 0.3t$). Para razones de esbeltez intermedias (figuras 5.8b y 5.8c), la resistencia a tracción comienza a mostrar influencia para casos con excentricidad moderada ($0.1t \leq e < 0.2t$). Mientras que para elementos con gran esbeltez (figura 5.8d), la resistencia a tracción muestra fuerte influencia incluso para casos con excentricidad cercana a cero. Para este último caso en particular, la capacidad de carga aumentaría en un 11% para excentricidad $e = 0.1t$, un 49% para excentricidad $e = 0.2t$ y un 218% para excentricidad $e = 0.3t$, si la resistencia a tracción pasara de un valor nulo a un 10% de la resistencia a compresión. Por lo tanto, la contribución de la resistencia a tracción sobre la capacidad de carga aumenta sensiblemente con el incremento de la razón de esbeltez y de la excentricidad de la carga.

Por otra parte, la figura 5.9 muestra curvas de estabilidad tensión-deflexión lateral de una pared con esbeltez 23 y relación $E = 900f_c$, para diferentes valores de resistencia a tracción (la deflexión lateral corresponde al desplazamiento horizontal de un nodo ubicado a altura media del elemento). Globalmente, la resistencia a tracción no presenta mayor influencia sobre la forma de la curva tensión-deflexión lateral, y parece presentar ligero impacto sobre la deflexión lateral máxima.

En la figura 5.9a, que corresponde al caso de excentricidad nula ($e = 0$), se aprecia claramente que el efecto de la resistencia a tracción es despreciable en cuanto a capacidad de carga y a deflexión lateral máxima. La curva además no presenta respuesta post-pico, hecho que está en total acuerdo con la evidencia experimental. Un comportamiento bastante similar puede ser observado para $e = 0.1t$ y $e = 0.2t$, aunque bajo estas excentricidades hay ligera respuesta post-pico. Finalmente, para $e = 0.3t$, la resistencia a tracción presenta clara influencia sobre la capacidad de carga, aunque no sobre la deflexión lateral máxima.

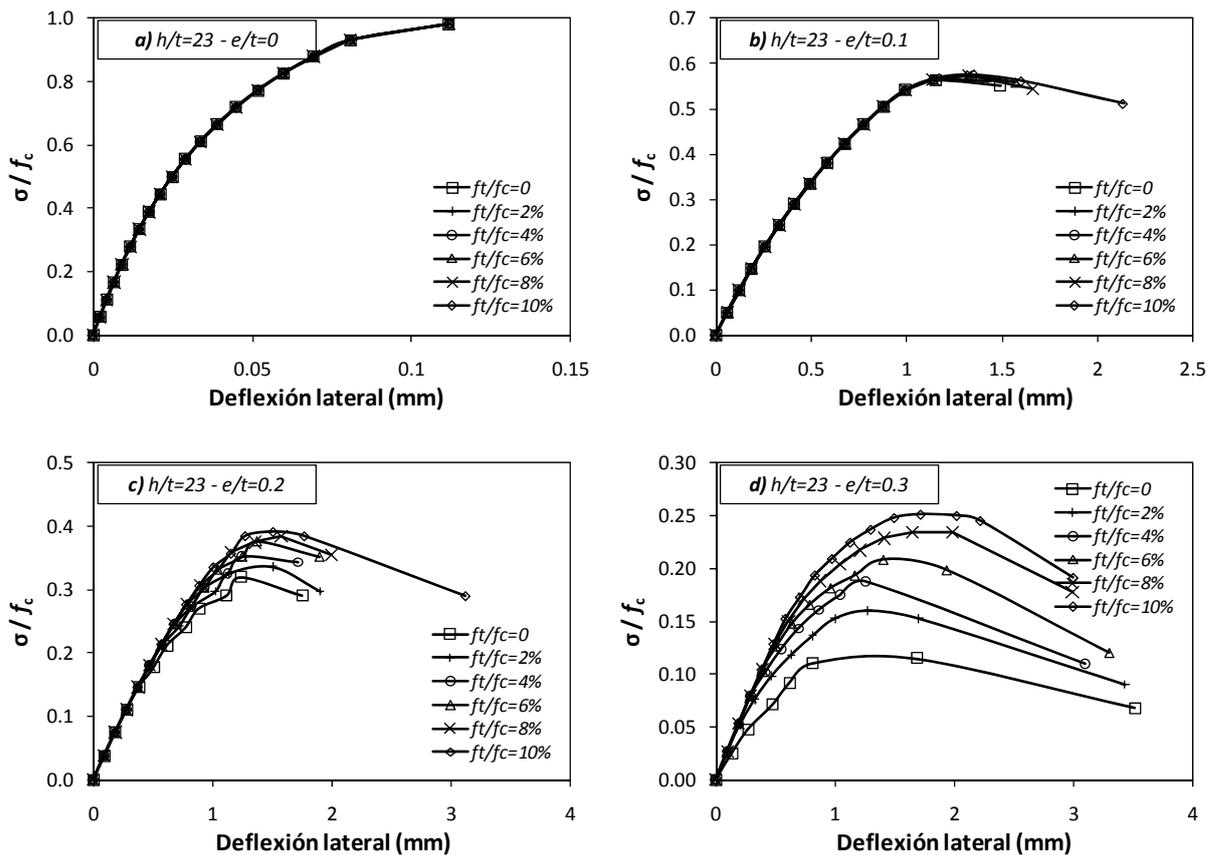


Figura 5.9 - Influencia de la resistencia a tracción. Relación entre la tensión normalizada y la deflexión lateral para un elemento de esbeltez 23 y relación $E = 900f_c$.

5.4. Discusión

Los resultados obtenidos a partir del estudio paramétrico han permitido lograr un mejor entendimiento de la influencia de diversos parámetros sobre el comportamiento general de paredes de obra de fábrica considerando el fallo por pandeo.

En particular, se ha confirmado el fuerte impacto que tiene la razón de esbeltez, la excentricidad de la carga y la rigidez del elemento sobre la capacidad portante. Dicho impacto puede ser resumido en la figura 5.10. En estas gráficas, que representan el conjunto de resultados numéricos obtenidos para resistencia a tracción nula, se observa claramente la forma de las curvas de capacidad conforme varían la esbeltez y la rigidez, para una determinada excentricidad. La influencia de la rigidez es particularmente notoria en los casos con excentricidad nula (figura 5.10a).

El estudio paramétrico también ha permitido estudiar la influencia de la resistencia a tracción. Esta característica, que habitualmente es desestimada, puede incrementar sensiblemente la capacidad de carga de una pared conforme aumenta la esbeltez y la excentricidad de la carga. Asimismo, su influencia resulta más evidente conforme disminuye la rigidez del elemento.

Un aspecto particularmente notable de los resultados obtenidos es la comprobación de la relación e interacción que tiene lugar entre la razón de esbeltez y la relación E/f_c . La unificación de estas dos variables a través de un único parámetro adimensional $\bar{\lambda}$ está en completo acuerdo con las teorías analíticas desarrolladas por algunos autores, entre los que destacan Sahlin (1959) y Kukulski y Lugez (1966).

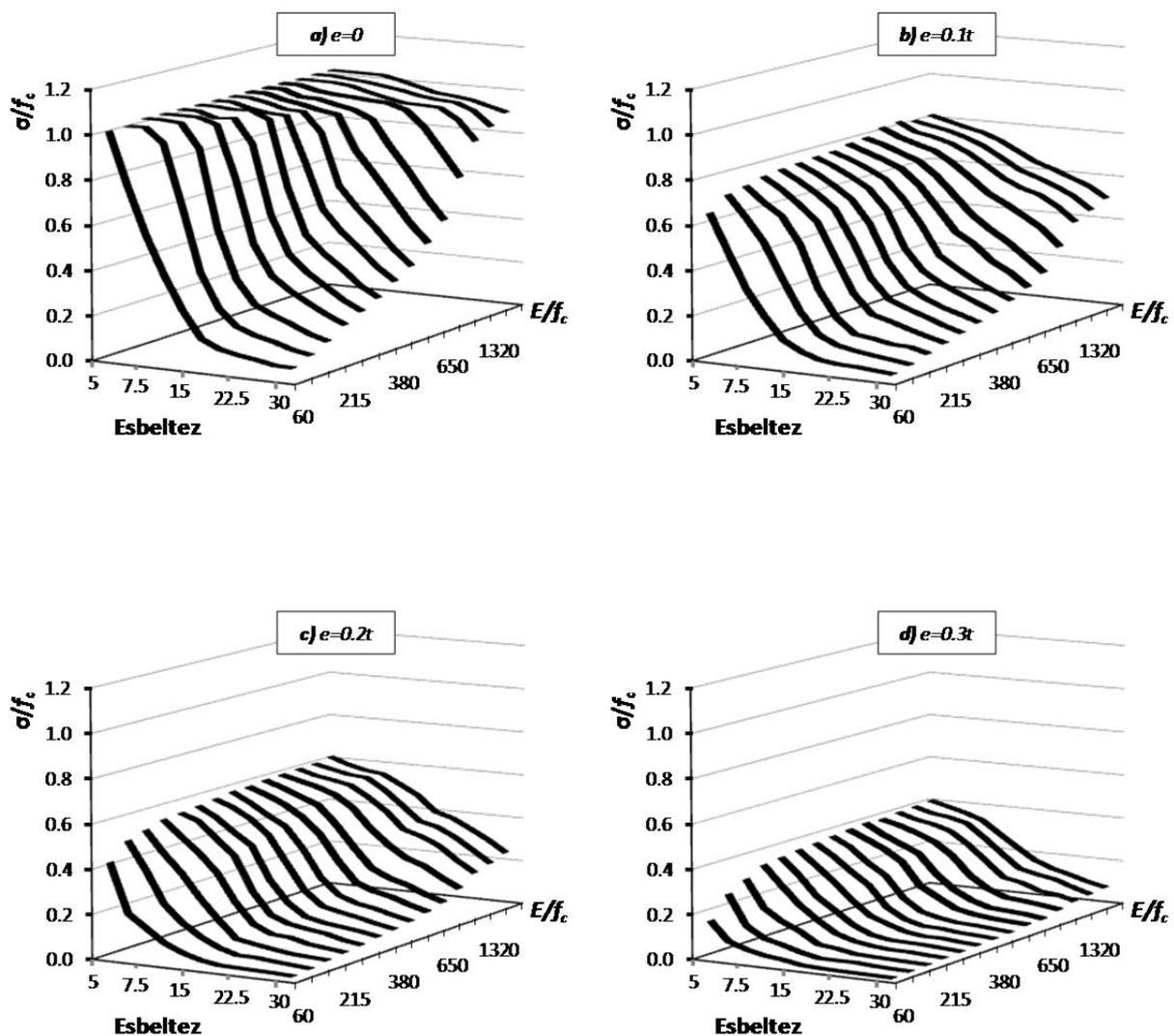


Figura 5.10- Influencia de la razón de esbeltez y la rigidez sobre la capacidad de carga para diferentes excentricidades.

La superposición de las gráficas de la figura 5.10, empleando el parámetro adimensional $\bar{\lambda}$, da paso a las curvas presentadas en la figura 5.11. Estas curvas permiten, por una parte, validar el procedimiento metodológico adoptado en la presente investigación, y por otra, validar los resultados numéricos obtenidos. Por ello, esta nueva alternativa, basada en la utilización sistemática de micro-modelos, es al mismo tiempo factible y efectiva para el estudio del comportamiento al pandeo de muros de obra de fábrica.

Por último, cabe destacar que la tensión normalizada σ/f_c corresponde al factor de reducción por esbeltez y excentricidad Φ usualmente empleado en fórmulas de diseño (EN 1996-1-1:2005; CTE-DB-SE-F, 2007). Por tanto, los resultados numéricos obtenidos permiten establecer una base de datos para desarrollar y proponer nuevas formulaciones para estimar factores de reducción.

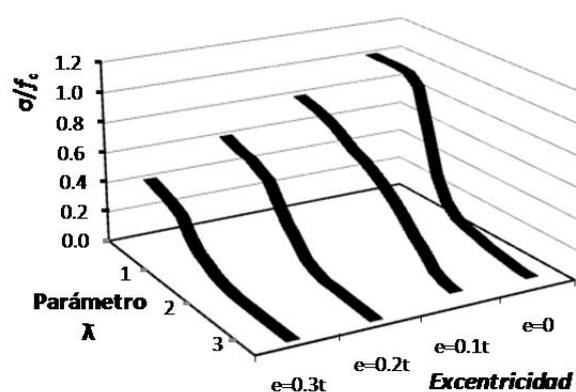


Figura 5.11 – Influencia del parámetro $\bar{\lambda}$ y la excentricidad de la carga sobre la capacidad de carga. Curvas para resistencia a tracción nula.

6

Propuestas para determinar factores de reducción

6.1. Introducción

Gran parte de los criterios simplificados y métodos analíticos disponibles para estimar la resistencia de muros de obra de fábrica bajo carga vertical emplean factores de reducción por esbeltez y excentricidad (ver apartado 2.5). Estos factores, que actúan reduciendo la capacidad resistente, necesariamente deben considerar la incidencia de los efectos relacionados con la no-linealidad geométrica y el pandeo en la capacidad de carga.

En el presente capítulo, la derivación y validación de nuevas fórmulas para estimar factores de reducción son presentadas y discutidas. El enfoque empleado está basado en los resultados obtenidos a partir de la explotación sistemática del micro-modelo simplificado propuesto por Lourenço y Rots (1997) y cuyos resultados fueron analizados en el capítulo anterior.

El conjunto de datos numéricos obtenidos a partir de la experimentación numérica desarrollada en el capítulo 5, presenta un claro comportamiento que puede ser descrito a través de una o varias funciones de mejor ajuste. Estas funciones, que tienen un enfoque empírico, serán establecidas mediante modelos de regresión que permiten ajustar los datos numéricos con una elevada correlación.

Las fórmulas seleccionadas deben validarse frente a resultados experimentales y normativos, y en la medida de lo posible, deben ser simples para facilitar su uso en situaciones prácticas.

Cabe notar que, la metodología empleada posibilita una descripción detallada del comportamiento de los datos numéricos sin llevar a cabo supuestos o simplificaciones. Ello permite, como novedad respecto a la mayoría de métodos previos disponibles, considerar la influencia favorable de la resistencia a tracción del material en el comportamiento al pandeo.

6.1.1. Objetivos

Los objetivos del presente capítulo son:

- Proponer aproximaciones simples para determinar la resistencia última de paredes de carga de obra de fábrica de ladrillo macizo a través de nuevos coeficientes de reducción por esbeltez y excentricidad.
- Validar y contrastar las formulaciones propuestas frente a la evidencia experimental disponible.
- Discutir acerca de los alcances y limitaciones de las nuevas formulaciones propuestas.

6.1.2. Organización del estudio

En la primera parte del presente capítulo (apartado 6.2) se define el procedimiento general de trabajo para obtener las fórmulas propuestas.

En el apartado 6.3 se presentan las tres formulaciones propuestas para determinar factores de reducción. Cada una de estas formulaciones obedece a un enfoque diferente, adoptado para lograr el mejor ajuste frente a los datos numéricos considerando resistencia a tracción nula. Luego, también dentro del apartado 6.3, se presenta una fórmula para evaluar la contribución de la resistencia a tracción. Los resultados de cada propuesta son contrastados frente a los datos numéricos, y más tarde, validados frente a resultados experimentales disponibles. Por último, en el apartado 6.5, se discute los alcances y limitaciones de las formulaciones propuestas.

6.2. Procedimiento de trabajo

El procedimiento de trabajo adoptado para obtener una aproximación que permita estimar factores de reducción se basa en ajustar una o más ecuaciones de regresión que ajusten satisfactoriamente los datos numéricos obtenidos. Evidentemente, estas ecuaciones describen como variable dependiente al coeficiente de reducción Φ y a los parámetros relevantes como variables independientes. Estos parámetros son la razón de esbeltez (h/t), la excentricidad de la carga (e/t) y la rigidez de la pared (E/f_c). De este modo, una función para determinar factores de reducción viene dada por $\Phi = f(h/t, e/t, E/f_c)$. A esta función puede sumarse una ecuación que representa la contribución de la resistencia a tracción de la fábrica a través del parámetro (f_t/f_c).

La filosofía de trabajo para determinar las aproximaciones se resume en la figura 6.1. Cabe notar que las ecuaciones de regresión general representan el comportamiento del factor de reducción Φ a media altura del elemento y su definición se plantea en términos del parámetro adimensional $\bar{\lambda}$ (que unifica los parámetros h/t y E/f_c) y la excentricidad de la carga e/t .

En la presente investigación se proponen tres funciones para estimar factores de reducción, cada una de ellas basada en un enfoque diferente. La primera de ellas corresponde a la curva con mejor ajuste frente a los datos numéricos. La segunda utiliza una ecuación similar a la empleada por Eurocódigo 6 (EN 1996-1-

1:2005). Finalmente, la tercera propuesta tiene en cuenta una ecuación general que representa el comportamiento de los datos numéricos para excentricidad nula y otra ecuación general que representa el efecto de la excentricidad de la carga.

El ajuste y puesta a punto de las diversas curvas ha sido realizado a través de LAB Fit Curve Fitting Software (Silva y Silva, 2010). Este software está orientado preferentemente al tratamiento y análisis estadístico de datos experimentales, siendo una de sus principales aplicaciones el ajuste de curvas utilizando regresión no-lineal.

La idoneidad de las ecuaciones encontradas es, en una primera etapa, contrastada frente a los datos numéricos y la bondad de los ajustes se evalúa mediante el coeficiente de correlación R^2 . Más tarde, las predicciones de cada curva son validadas frente a resultados experimentales disponibles. Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del método propuesto por la normativa vigente (EN 1996-1-1:2005) también son comparados y discutidos.

El muestreo de casos numéricos considerado es el conjunto de 3696 resultados obtenidos a partir del estudio paramétrico presentado en el capítulo anterior.

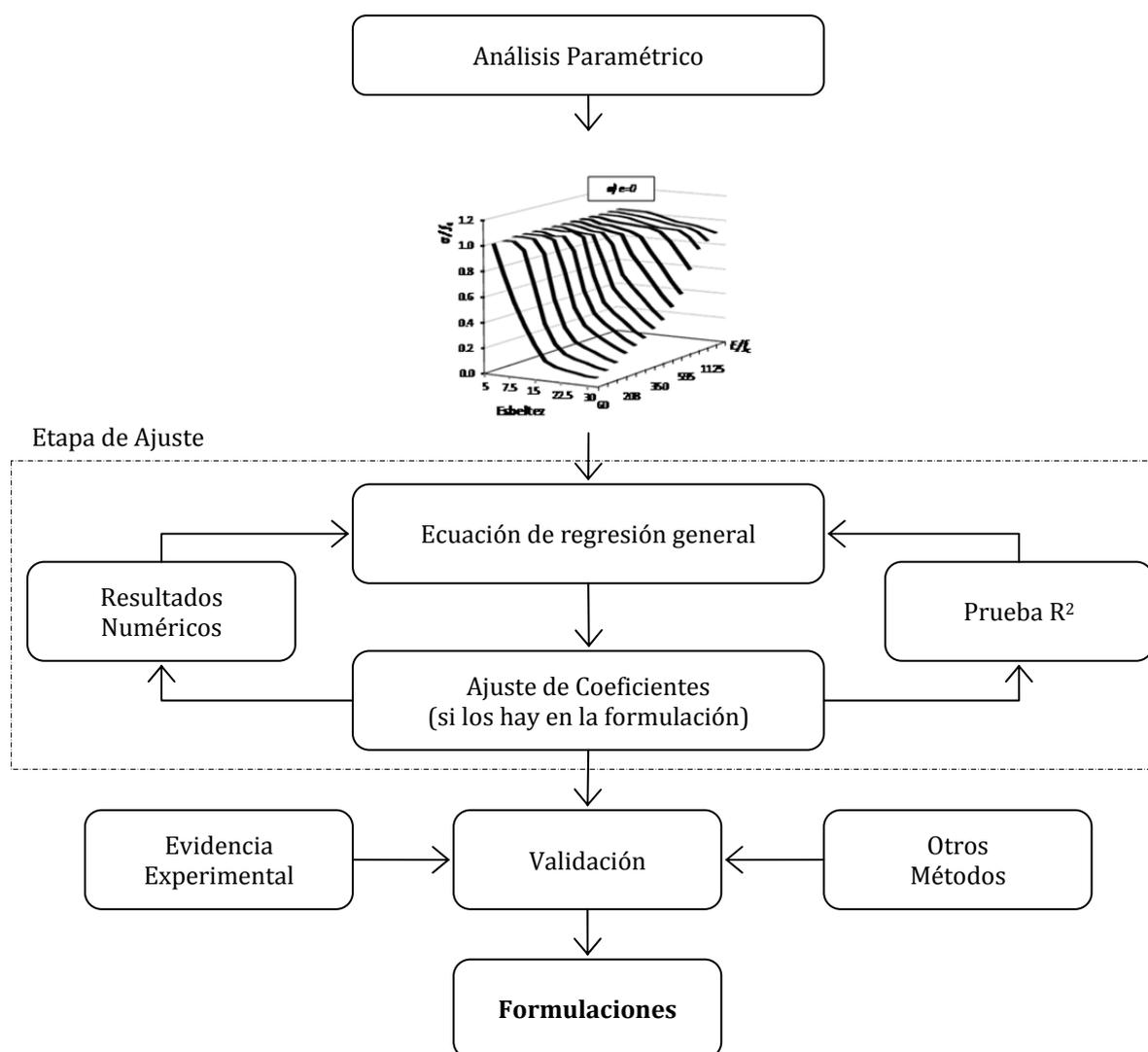


Figura 6.1 – Procedimiento de trabajo para validar nuevas propuestas

6.3. Propuestas para determinar coeficientes de reducción

6.3.1. Planteamiento general

Sobre la base de los datos obtenidos en el estudio paramétrico, en el presente apartado se presentan tres diferentes fórmulas para determinar coeficientes de reducción por esbeltez y excentricidad en paredes de carga de obra de fábrica.

Cada una de las tres propuestas desarrolladas en la presente investigación se basa en una estrategia diferente:

- Propuesta #1 : obtención de una ecuación general con el mejor ajuste posible frente a los datos numéricos.
- Propuesta #2 : mejor ajuste empleando una ecuación similar a la propuesta por Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005).
- Propuesta #3 : enfoque similar al empleado por Lu (2003). Es decir, ajustar una ecuación general que represente el comportamiento bajo carga concéntrica, multiplicado por una ecuación que represente el efecto de la excentricidad de la carga.

El rango de valores para los parámetros relevantes se ha definido en acuerdo con Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005), particularmente en lo relativo a los valores máximos aceptados para la razón de esbeltez y la excentricidad de la carga (27 y $t/3$, respectivamente). Limitar la esbeltez a 27 parece razonable, pues ya se trata de una razón elevada y difícil de encontrar en edificaciones existentes. Por otra parte, aunque posiblemente existan situaciones prácticas en donde la excentricidad de la carga sea mayor que $t/3$, no existen valores de referencia experimentales que permitan contrastar resultados numéricos o analíticos. De todas formas, las formulaciones propuestas en la presente investigación podrían utilizarse como extrapolación a casos prácticos con mayores excentricidades. Ello requiere, en cualquier caso, una aplicación e interpretación adecuada por parte del técnico.

El rango establecido para la rigidez, expresada en términos de E/f_c , comprende valores entre 200 y 1200 (rango de posibles valores a encontrar en la práctica). La tabla 6.1 resume los valores límite establecidos en las formulaciones propuestas.

Tabla 6.1 – Límites de aplicabilidad

Parámetro		Valores	
		min	máx
Esbeltez	(h/t)	5	27
Excentricidad	(e/t)	0	1/3
Deformabilidad	(E/f _c)	200	1200

A continuación se exponen las tres propuestas para estimar factores de reducción por esbeltez y excentricidad. Cada propuesta de ecuación ha sido ajustada a partir de los datos numéricos considerando resistencia a tracción nula ($f_t = 0$). La contribución de la resistencia a tracción se presenta en el apartado 6.3.5. de manera separada. Los datos numéricos sobre los cuales se basan los ajustes de las tres ecuaciones propuestas se encuentran en el apéndice A, mientras que los datos para estimar la contribución de la resistencia a tracción se encuentran en el apéndice B.

6.3.2. Propuesta #1

6.3.2.1. Formulación

La propuesta #1 parte de la siguiente ecuación general, que representa el mejor ajuste frente al conjunto de datos numéricos:

$$\Phi_0 = \left[A \exp(B \cdot \bar{\lambda}^C) + D \right]_{f_{t=0}} \quad [6.1]$$

donde

$$\bar{\lambda} = \frac{h}{t} \sqrt{\frac{f_c}{E}}$$

El ajuste de la ecuación 6.1 se ha llevado a cabo para los resultados numéricos de cada excentricidad considerada en el estudio paramétrico (esto es, excentricidades iguales a 0, 0.1t, 0.2t y 0.33t). En este proceso, los parámetros A, B, C y D de la ecuación 6.1 adoptan diferentes valores en función de la excentricidad. Luego, el comportamiento de cada parámetro puede representarse a través de una curva de mejor ajuste. La representación gráfica de los parámetros A, B, C y D, así como la función de mejor ajuste, se puede observar en la figura 6.2. En cada gráfica, la función de mejor ajuste presenta ajustes satisfactorios, logrando en todos los casos una correlación muy elevada.

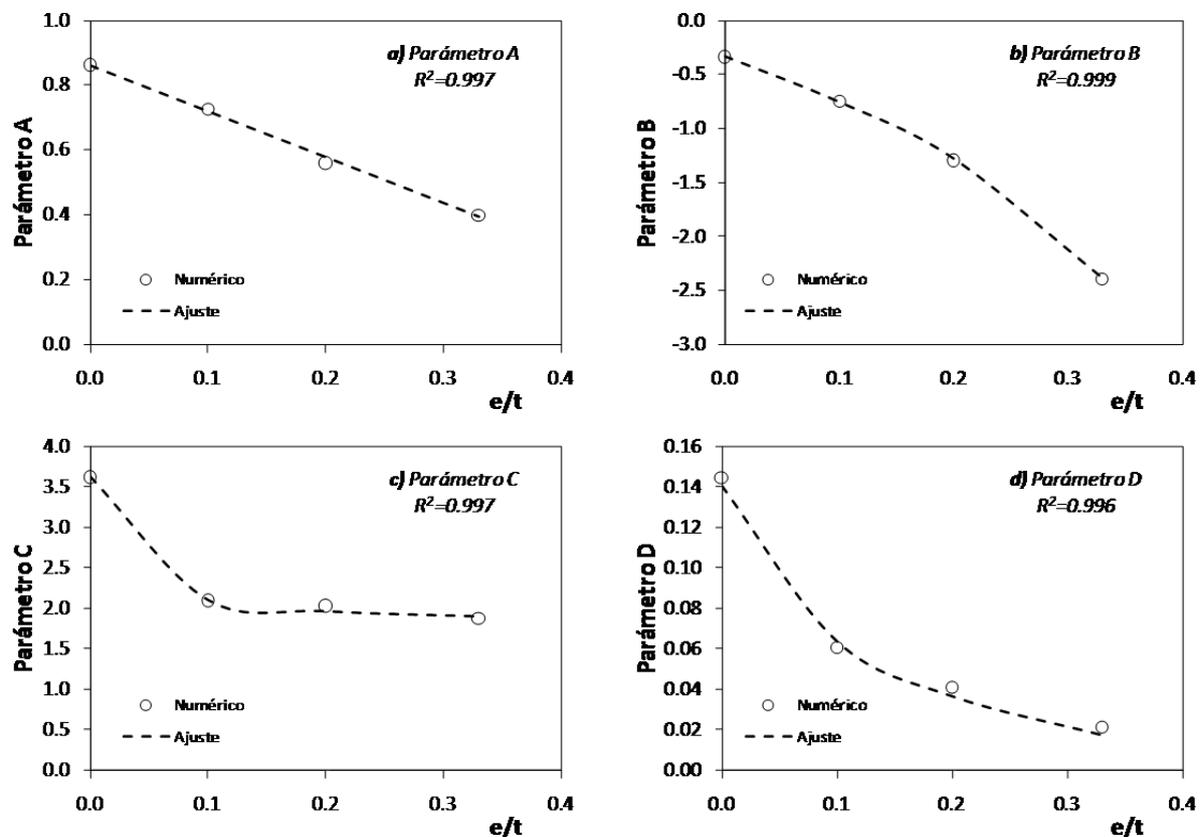


Figura 6.2 – Curvas de ajuste: a) parámetro A, b) parámetro B, c) parámetro C, y d) parámetro D.

El ajuste de los parámetros A, B, C y D, de acuerdo con el proceso descrito anteriormente, da lugar a las siguientes expresiones:

$$A = -1.42 \frac{e}{t} + 0.86 \quad [6.2]$$

$$B = \frac{0.084 + \frac{e}{t}}{-0.25 + 0.7 \left(\frac{e}{t}\right)^2} \quad [6.3]$$

$$C = \frac{1}{\left(0.56 - 14.1 \cdot \ln\left(1 - 2\frac{e}{t}\right)\right)} + 1.84 \quad [6.4]$$

$$D = 0.036 \cdot \tan\left(1.32 \cdot \left(1 - 2\frac{e}{t}\right)\right) \quad [6.5]$$

6.3.2.2. Contrastación frente a resultados numéricos

Tomando en cuenta los valores límites establecidos para los diferentes parámetros, la figura 6.3 muestra una comparación entre resultados obtenidos a través de la ecuación 6.1 y los datos numéricos. Como se puede observar, el ajuste es satisfactorio, siendo la correlación entre los datos numéricos y la predicción mediante la ecuación 6.1 muy elevada. El coeficiente de correlación promedio frente a los datos numéricos es de 0.995.

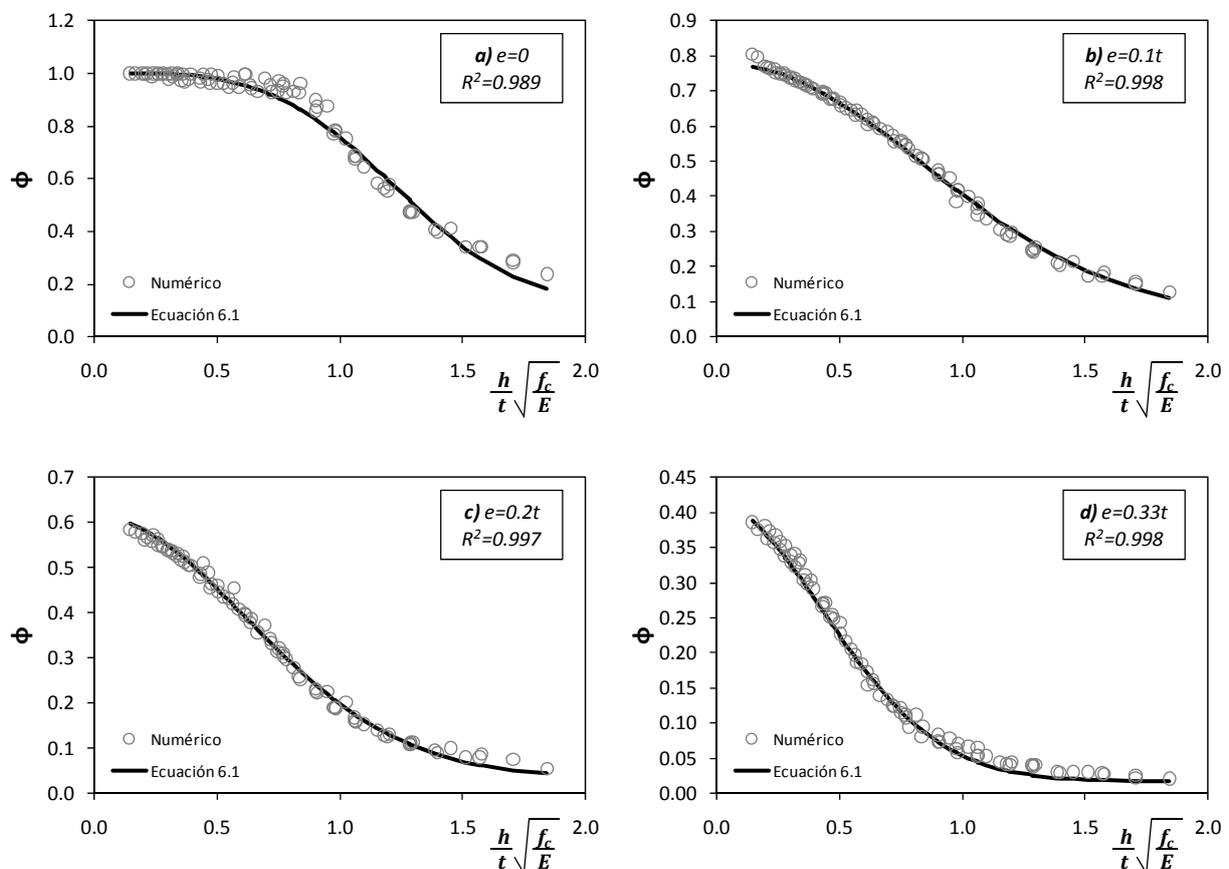


Figura 6.3 – Comparación entre resultados numéricos y ecuación 6.1

6.3.3. Propuesta #2

6.3.3.1. Formulación

Tal y como ha sido mencionado, el diseño estructural de muros de obra de fábrica de acuerdo con Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) emplea una función exponencial para determinar el factor de reducción por esbeltez y excentricidad en el quinto central de la altura del elemento. Esta función es de la forma:

$$\Phi_0 = \left[\left(1 - 2 \frac{e}{t} \right) \exp(-0.5u^2) \right]_{f_{t=0}} \quad [6.6]$$

donde el factor numérico u viene dado por la expresión

$$u = \frac{\bar{\lambda} - \alpha}{\beta - \rho \frac{e}{t}} \quad [6.7]$$

Haciendo uso de la ecuación 6.6, el proceso de ajuste del factor numérico u frente a los datos numéricos permite obtener nuevos valores para los coeficientes α , β y ρ . Dichos valores permiten, por tanto, reescribir el factor u como:

$$u = \frac{\bar{\lambda} - 0.0756}{1.075 - 2.26 \frac{e}{t}} \quad [6.8]$$

6.3.3.2. Contrastación frente a resultados numéricos

Tomando en cuenta los valores límites establecidos para los diferentes parámetros, la figura 6.4 muestra una comparación entre resultados obtenidos a través de la ecuación 6.6, Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) y los resultados obtenidos numéricamente. Aunque el nivel de aproximación obtenido entre los datos numéricos y la ecuación 6.6 se puede considerar satisfactorio ($R^2=0.982$), el ajuste resulta claramente menos preciso que el obtenido a través de la ecuación 6.1 (propuesta #1).

El ajuste en el caso de excentricidad nula es el menos preciso, seguido del caso con $e = t/3$ (límite inferior y superior para la excentricidad respectivamente). En particular, la ecuación 6.6 no es capaz de reproducir satisfactoriamente la tendencia de los datos numéricos para valores de $\bar{\lambda}$ comprendidos entre 0.5 y 1, aunque la falta de precisión en estos casos queda del lado de la seguridad.

Las gráficas también permiten contrastar las predicciones realizadas mediante Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005). Cabe notar que para propósitos de comparación, los cálculos con este método consideran factor de seguridad igual a 1, mientras que las excentricidades accidental y por creep no han sido consideradas.

La comparación muestra que en todos los casos evaluados, el método propuesto por Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) tiende a subestimar conservadoramente el factor de reducción, y por lo tanto, la capacidad resistente de los muros. Frente a las predicciones llevadas a cabo mediante Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005), el uso de la ecuación 6.6 podría suponer un incremento de hasta un 28% en el cálculo de Φ si la excentricidad fuese $e = 0$. Este incremento del factor de reducción disminuye a medida que aumenta la excentricidad de la carga, siendo de hasta un 19% si $e = 0.1t$; 10% si $e = 0.2t$; y 2% si $e = 0.33t$.

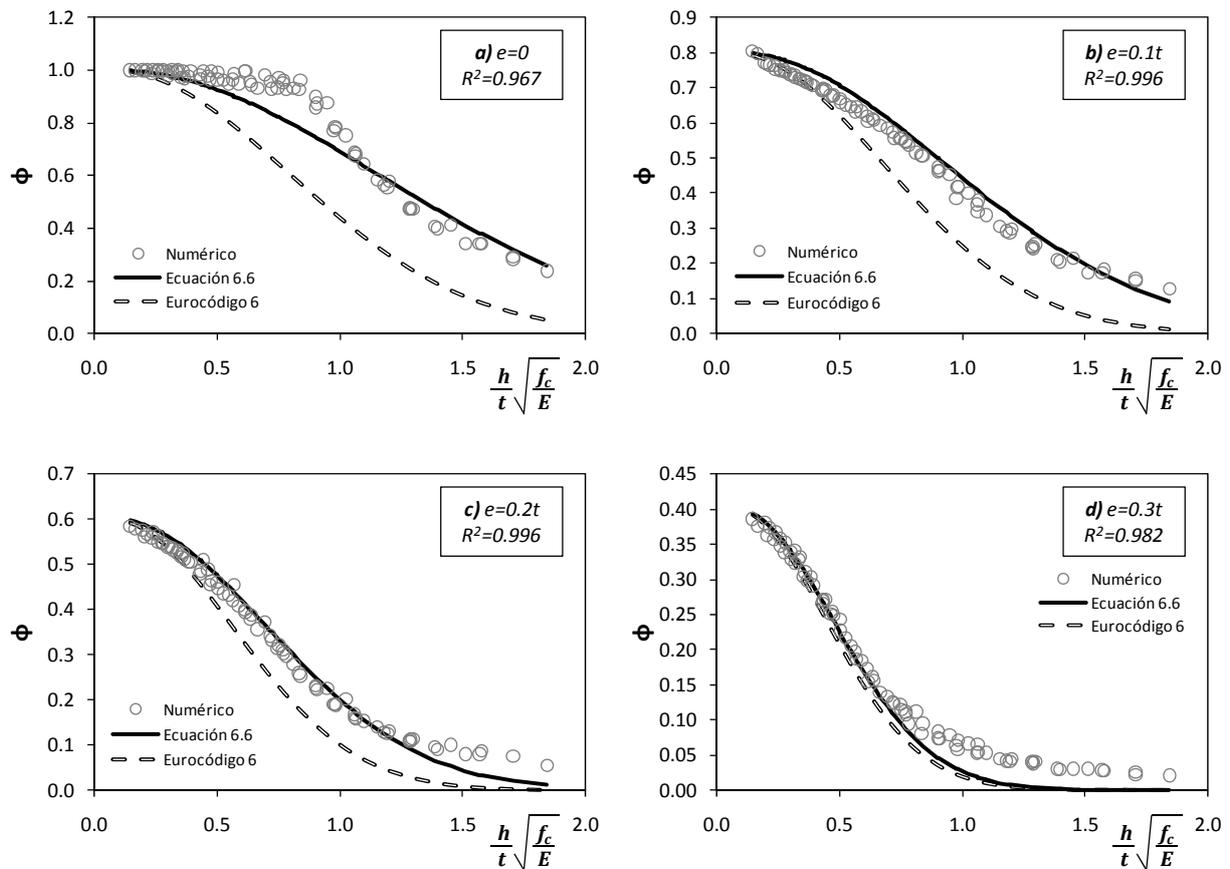


Figura 6.4 - Comparación entre datos numéricos, Ecuación 6.6 y Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005)

6.3.4. Propuesta #3

6.3.4.1. Formulación

Para muros construidos con unidades macizas bajo carga vertical excéntrica, Lu (2003) propone estimar la carga crítica de pandeo a través de la multiplicación de una función exponencial que represente el comportamiento para excentricidad nula por otra función que represente el efecto de la excentricidad de la carga. Siguiendo este enfoque, al realizar el ajuste con los datos numéricos de la presente investigación, resulta la siguiente expresión:

$$\Phi_0 = \Phi_e \cdot \left[\frac{1}{1 + 1.1\bar{\lambda}^2} \exp\left(\frac{\bar{\lambda}^2}{1 + \bar{\lambda}^{4.5}}\right) \right]_{\frac{e}{t}=0; f_t=0} \quad [6.9]$$

donde Φ_e representa el efecto de la excentricidad de la carga, que queda definido por el siguiente ajuste:

$$\Phi_e = \left(1 - 2\frac{e}{t}\right)^{\frac{3.5\bar{\lambda}^2 + 0.65}{\bar{\lambda}^2 + 0.65}} \quad [6.10]$$

6.3.4.2. Contrastación frente a resultados numéricos

Tomando en cuenta los valores límites establecidos para los diferentes parámetros, la figura 6.5 muestra una comparación entre resultados obtenidos a través de la ecuación 6.9 y los resultados obtenidos numéricamente. El nivel de aproximación obtenido es satisfactorio. La bondad del ajuste en cada curva es elevada, alcanzando una correlación promedio de 0.994. Esta correlación promedio es ligeramente inferior a la lograda a través de la ecuación 6.1 y superior a la lograda a través de la ecuación 6.6.

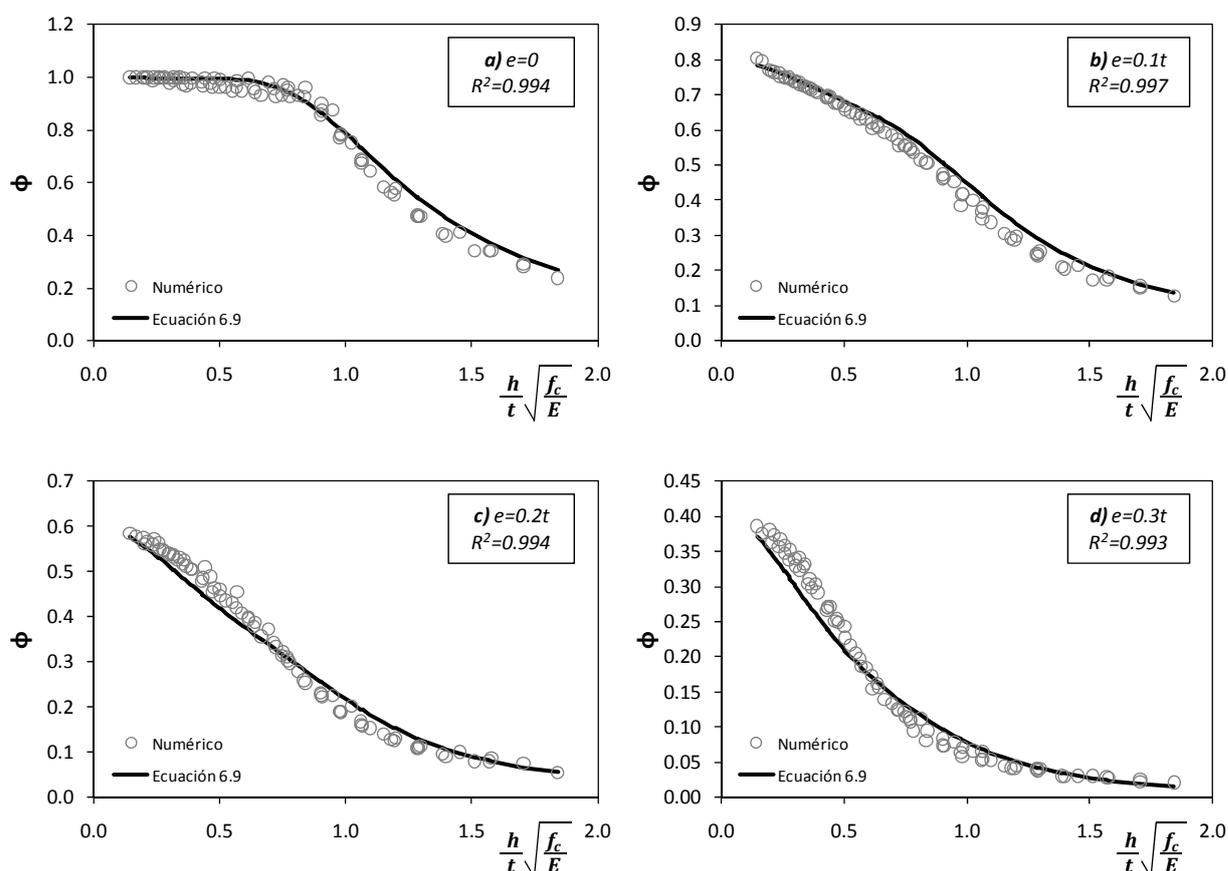


Figura 6.5 - Comparación entre datos numéricos y Ecuación 6.9

6.3.5. Efecto de la resistencia a tracción

En el apartado 5.3.4 se discutió acerca del efecto de la resistencia a tracción sobre la capacidad de carga. En dicha discusión se puso de manifiesto que el efecto de la resistencia a tracción depende fuertemente de la razón de esbeltez y de la deformabilidad del elemento, así como también de la excentricidad de la carga. Como ya ha sido comentado, los parámetros h/t y E/f_c quedan perfectamente relacionados a través del parámetro adimensional $\bar{\lambda}$, mientras que éste, a su vez, se puede vincular con la excentricidad de la carga e/t a través de Φ_e (ecuación 6.10).

El procedimiento para representar el efecto de la resistencia a tracción ha consistido en determinar la diferencia que se produce en el factor de reducción al considerar un cierto valor de f_t frente a considerar resistencia a tracción nula ($f_t = 0$). Cabe notar que, la contribución de la resistencia a tracción en muros sometidos a carga vertical con nula o pequeña excentricidad de la carga ($e < 0.1t$) es pequeña. Es decir, la resistencia a tracción no provee un incremento significativo en la capacidad de carga (ver apartado 5.3.4).

Por ello, en la presente investigación se ha desarrollado una propuesta basada en la consideración de la contribución de la resistencia a tracción a partir de una excentricidad igual o superior a $0.1t$. Además, cabe notar que no se cuenta con resultados numéricos para una excentricidad intermedia entre 0 y $0.1t$ que permitan estimar la contribución de f_t entre estas dos excentricidades. De este modo, el ajuste de una ecuación empírica para evaluar el incremento en el factor de reducción debido a la contribución de la resistencia a tracción queda dada por:

$$\Delta\Phi_{f_t=f_t} = f_t \cdot \left[\frac{1}{X + Y\Phi_e + Z\sqrt{\Phi_e}} \right] \quad \text{para } 0.1 \leq \frac{e}{t} \leq 0.33 \quad [6.11]$$

donde f_t es la resistencia a tracción, Φ_e corresponde a la ecuación 6.10 (que representa el efecto de la excentricidad de la carga) y los coeficientes X, Y y Z pueden obtenerse a través de las siguientes expresiones:

$$X = \begin{cases} -144261 \frac{e}{t} + 29306 & \text{si } 0.1t \leq e < 0.2t \\ -3017.3 \frac{e}{t} + 1057.4 & \text{si } 0.2t \leq e < 0.33t \end{cases} \quad [6.12]$$

$$Y = \begin{cases} -259620 \frac{e}{t} + 53542 & \text{si } 0.1t \leq e < 0.2t \\ -9550 \frac{e}{t} + 3528 & \text{si } 0.2t \leq e < 0.33t \end{cases} \quad [6.13]$$

$$Z = \begin{cases} 387930 \frac{e}{t} - 79273 & \text{si } 0.1t \leq e < 0.2t \\ 10833 \frac{e}{t} - 3853.6 & \text{si } 0.2t \leq e < 0.33t \end{cases} \quad [6.14]$$

En definitiva, si se desea considerar el efecto de la resistencia a tracción a través de la ecuación 6.11, su contribución se puede sumar a cualquiera de las tres ecuaciones propuestas anteriormente (ecuaciones 6.1, 6.6 o 6.9). Es decir, el concepto general están basado en:

$$\Phi_T = \Phi_0 + \Delta\Phi_{f_t} \quad [6.15]$$

Cabe notar que, la ecuación 6.11 ha sido calibrada considerando una resistencia a tracción máxima de hasta el 10% de la resistencia a compresión de la fábrica. El conjunto de datos que han sido utilizados para llevar a bajo los ajustes son dados en el apéndice B.

La figura 6.6 muestra la comparación entre los datos numéricos y los obtenidos a través de la ecuación 6.11, para distintas excentricidades. En estas gráficas, el eje de las ordenadas representa la diferencia en el factor de reducción $\Delta\Phi$ que se produjo en los resultados numéricos entre considerar una cierta resistencia a tracción y la resistencia a tracción nula, mientras que el eje de las abscisas representa el efecto de la resistencia a tracción expresado en términos de Φ_e (ecuación 6.10).

Debido a que el parámetro Φ_e reúne simultáneamente tres parámetros (esbeltez, rigidez y excentricidad), puede ocurrir que para varias combinaciones de ellos, Φ_e tome un valor similar. Por ello, en las gráficas de la figura 6.6 se observan múltiples resultados para un mismo valor de abscisa.

También, cabe destacar que Φ_e es una aproximación y que debido a la influencia de los parámetros que lo integran, puede que no recoja toda la complejidad del fenómeno. Ello también podría explicar la dispersión que se observa en la figura 6.6. A pesar de la amplia dispersión, la ecuación 6.11 logra reproducir, de manera satisfactoria, la tendencia general mostrada por los datos numéricos.

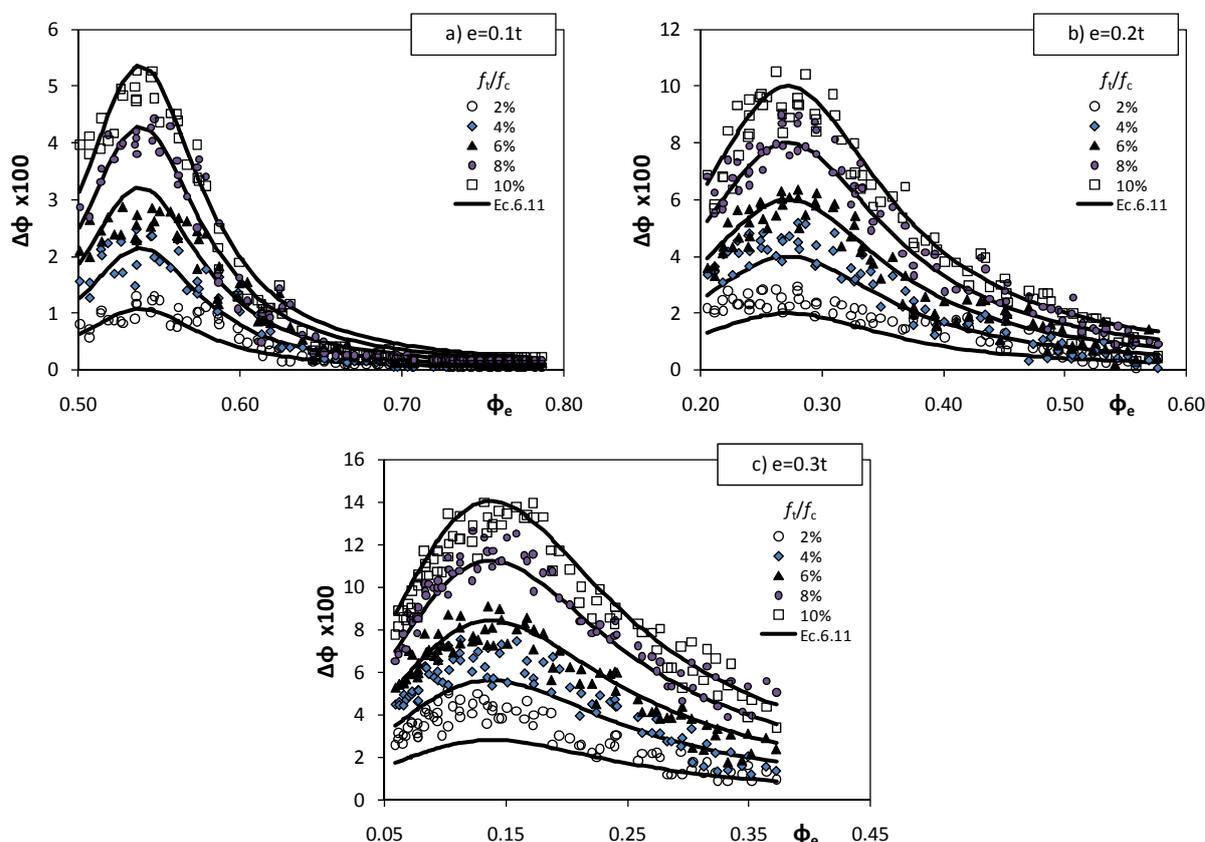


Figura 6.6 – Influencia de la resistencia a tracción. Ecuación 6.11 frente a los datos numéricos.

6.4. Verificación frente a resultados experimentales

En orden a verificar la precisión de las fórmulas propuestas, este subapartado compara las predicciones de factores de reducción por esbeltez y excentricidad obtenidas a partir de las ecuaciones 6.1, 6.6 y 6.9 contra datos experimentales obtenidos en la presente investigación y otros reportados en la literatura.

Todos los experimentos considerados para llevar a cabo la verificación han sido realizados en condición bi-articulada y con igual excentricidad en ambos extremos. Estos resultados experimentales corresponden a los obtenidos en la presente investigación (capítulo 3) y otros reportados en la literatura, revisados en el apartado 2.5.

Las ecuaciones 6.1, 6.6 y 6.9 requieren pocos parámetros de entrada, que en el caso de aquellos parámetros materiales pueden ser fácilmente obtenidos a través de experimentación o a través de relaciones simples propuestas en la literatura. Para facilitar la comprensión al lector, en cada campaña experimental utilizada para verificar las fórmulas se resumen los parámetros geométricos y materiales necesarios. Para los casos con excentricidad superior a $0.1t$ se ha tenido en cuenta el aporte de la resistencia a tracción a través de la ecuación 6.11.

Cabe notar que las características de la fábrica, en términos de resistencia a compresión f_c y de módulo de elasticidad E , son fundamentales para lograr un buen desempeño de las ecuaciones propuestas.

6.4.1. Presente investigación

Los parámetros geométricos y materiales correspondientes a los ensayos realizados en la presente investigación, necesarios para aplicar las fórmulas propuestas (presentados en el capítulo 3), son los siguientes:

- Razones de esbeltez h/t : 6.8, 12.6, 18.7, 25.6
- Excentricidades e/t : 0, 1/6, 1/3
- Resistencia a compresión f_c : 14.2 N/mm²
- Resistencia a tracción f_t : 0.55 N/mm²
- Módulo de Young E : 3458 N/mm²
- Relación E/f_c : 244

La figura 6.7 muestra la comparación entre las predicciones de las fórmulas propuestas y los datos experimentales. La comparación, en general, es satisfactoria. Globalmente, cada formulación muestra buena capacidad para reproducir la tendencia general de los datos experimentales.

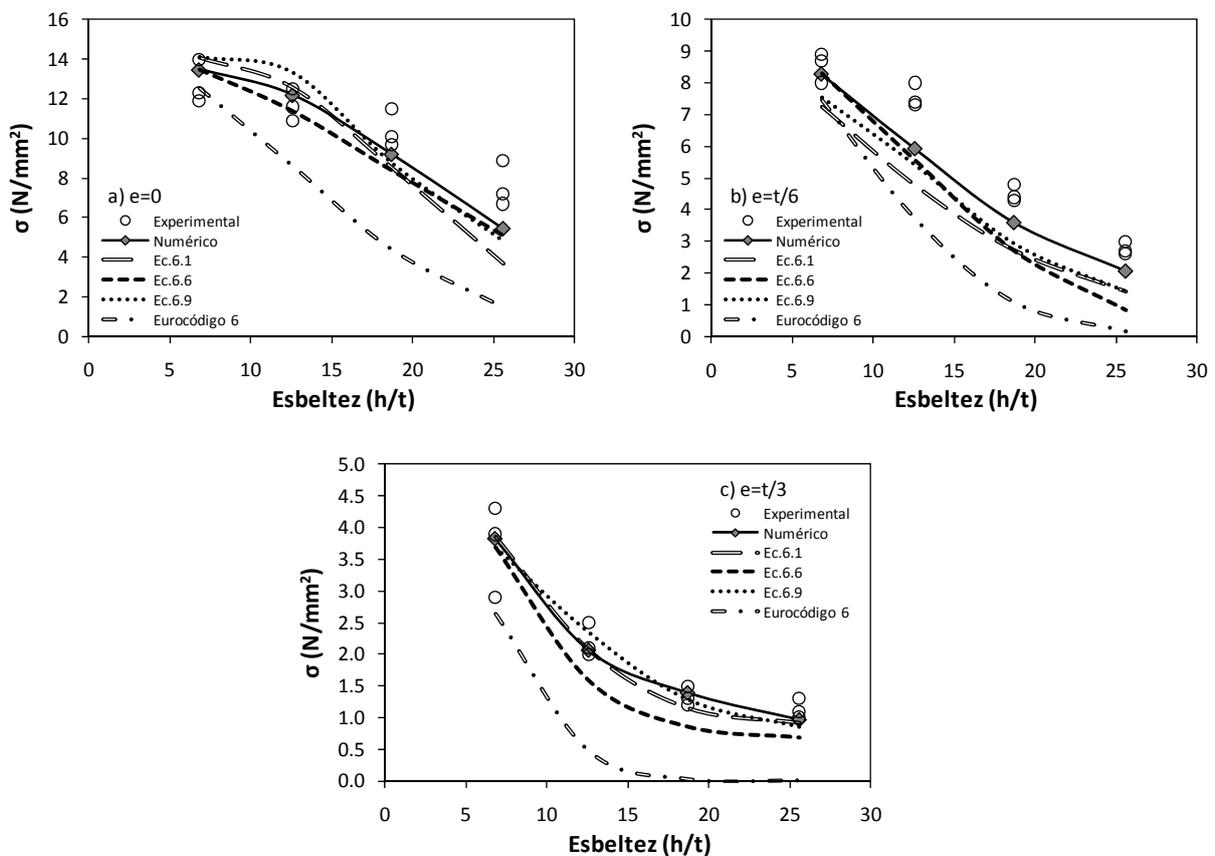


Figura 6.7 – Comparación de tensiones últimas. Fórmulas propuestas frente a datos experimentales de la presente investigación

En la figura 6.7, particularmente notable es la precisión lograda por las ecuaciones 6.1 y 6.9 para el caso de excentricidad $e = 0.3t$. En el caso de excentricidad nula, se observa una ligera sobreestimación de la tensión de rotura para esbelteces bajas y una subestimación para esbelteces elevadas. A pesar de ello, las predicciones se consideran aceptables, ya que el caso más complejo de reproducir es justamente bajo carga concéntrica.

Las gráficas también permiten contrastar las predicciones realizadas mediante Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005). Cabe notar que para propósitos de comparación, los cálculos con este método consideran factor de seguridad igual a 1, mientras que las excentricidades mínima, accidental y por creep no han sido consideradas.

La comparación muestra que en todos los casos evaluados, el método propuesto por Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) tiende a subestimar conservadoramente el factor de reducción, y por lo tanto, la capacidad resistente de los muros.

6.4.2. Hasan y Hendry (1976)

Los parámetros geométricos y materiales correspondientes a los ensayos llevados a cabo por Hasan y Hendry (1976) fueron revisados en el apartado 2.5.1. A continuación se resumen aquellos necesarios para aplicar las fórmulas propuestas:

- Razones de esbeltez h/t : 6.0, 12.0, 18.0, 25.0
- Excentricidades e/t : 0, 1/6, 1/3
- Resistencia a compresión f_c : 13.1-19.5 N/mm²
- Resistencia a tracción f_t : 0.35 N/mm² (~2% de f_c)
- Módulo de Young E : 2940-12600 N/mm²
- Relación E/f_c : 214-887

En orden a verificar la precisión de las formulaciones propuestas se ha empleado una resistencia a compresión igual a $f_c = 13.8$ N/mm². Asimismo, el valor considerado para el módulo elástico ha sido $E = 6530$ N/mm². Estos valores experimentales están en acuerdo con el rango de valores reportados por los autores, y corresponden al valor promedio para probetas de esbeltez 6, ensayadas bajo carga concéntrica. De acuerdo con dichos valores, la relación experimental de E/f_c resulta igual a 473.

La figura 6.8 muestra la comparación entre las predicciones de las fórmulas propuestas y los datos experimentales. La comparación entre las predicciones de las fórmulas 6.1, 6.6 y 6.9 y los datos experimentales se puede considerar satisfactoria.

Cada formulación propuesta muestra buena capacidad para reproducir la tendencia general mostrada por los datos experimentales. Bajo carga concéntrica, la ecuación 6.9 entrega los resultados más conservadores, sin embargo en cada esbeltez la predicción queda contenida dentro de la dispersión experimental. Además, coincidiendo con la comparación frente a los resultados de la presente investigación, la ecuación 6.9 ofrece los resultados más conservadores para excentricidad $t/3$, particularmente para razones de esbeltez elevadas. Este hecho era, en cierto modo esperable, debido a la menor correlación que presentó dicha ecuación frente a los datos numéricos.

Por su parte, las predicciones realizadas mediante el método propuesto por 6 (EN 1996-1-1:2005) nuevamente se muestran conservadoras para todas las excentricidades, aunque presenta valores más precisos para los casos $e = t/6$ y $e = t/3$.

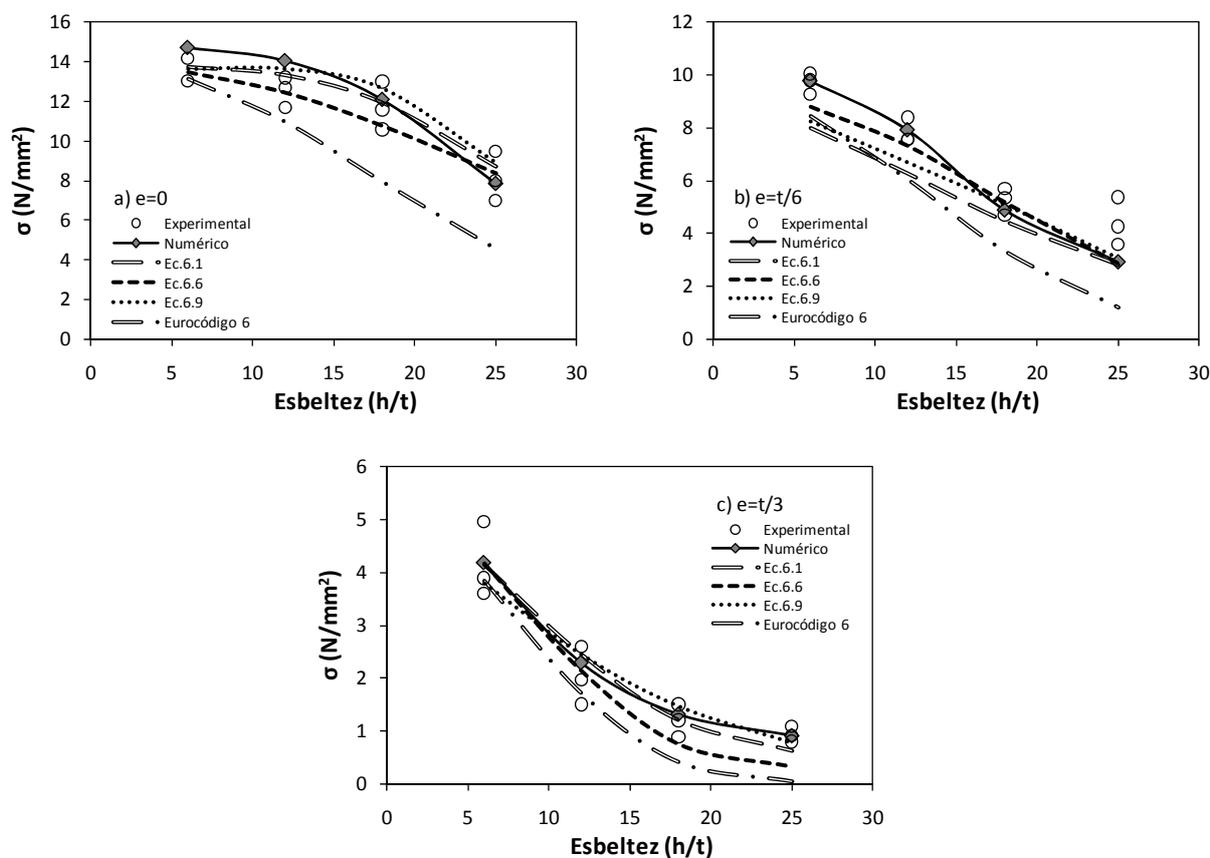


Figura 6.8 - Comparación de tensiones últimas. Fórmulas propuestas frente a datos experimentales reportados por Hasan y Hendry (1976)

6.4.3. Kirtschig y Anstötz (1991)

Los parámetros geométricos y materiales correspondientes a los ensayos llevados a cabo por Kirtschig y Anstötz (1991) fueron revisados en el apartado 2.5.3. A continuación se resumen aquellos necesarios para aplicar las fórmulas propuestas:

- Razones de esbeltez h/t : 5.6, 11.1, 18.8, 27.7
- Excentricidades e/t : 0, 1/8, 1/4, 1/3
- Resistencia a compresión f_c : 12.2 N/mm²
- Resistencia a tracción f_t : 0.2 N/mm² (~2% de f_c)
- Módulo de Young E : 8522 N/mm²
- Relación E/f_c : 700

En los análisis numéricos llevados a cabo para reproducir los resultados reportados por Kirtschig y Anstötz (1991) se utilizó una relación $E/f_c = 700$. Esta relación fue inferida a partir de los datos aportados por los autores y, aunque los resultados numéricos presentan un ajuste satisfactorio, parece ser una relación elevada. En Glock (2004), el valor asignado a la deformación pico bajo compresión para estos experimentos fue de 1.7‰, lo que equivale a una relación E/f_c igual a 588. En orden a evaluar la precisión

de las formulaciones propuestas se ha utilizado esta última relación ($E/f_c = 588$), ya que la utilización de la relación originalmente inferida ($E/f_c = 700$) entrega valores muy por encima de los valores experimentales reportados.

La figura 6.9 muestra la comparación entre las predicciones de las fórmulas propuestas y los datos experimentales. La comparación entre las predicciones de las fórmulas 6.1, 6.6 y 6.9 y los datos experimentales es satisfactoria utilizando una relación E/f_c corregida. Sin embargo, cabe notar que aún empleando una relación de rigidez inferior, las predicciones obtenidas a través de las fórmulas propuestas sobreestiman ligeramente, en varios casos, las tensiones de rotura experimentales. Este hecho indicaría que la relación de rigidez podría ser aún más baja que la utilizada en los cálculos.

Nuevamente las predicciones realizadas mediante Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) son las más conservadoras. No obstante, para esta campaña entrega valores muy próximos a los experimentales en todas las excentricidades, excepto para $e = 0$.

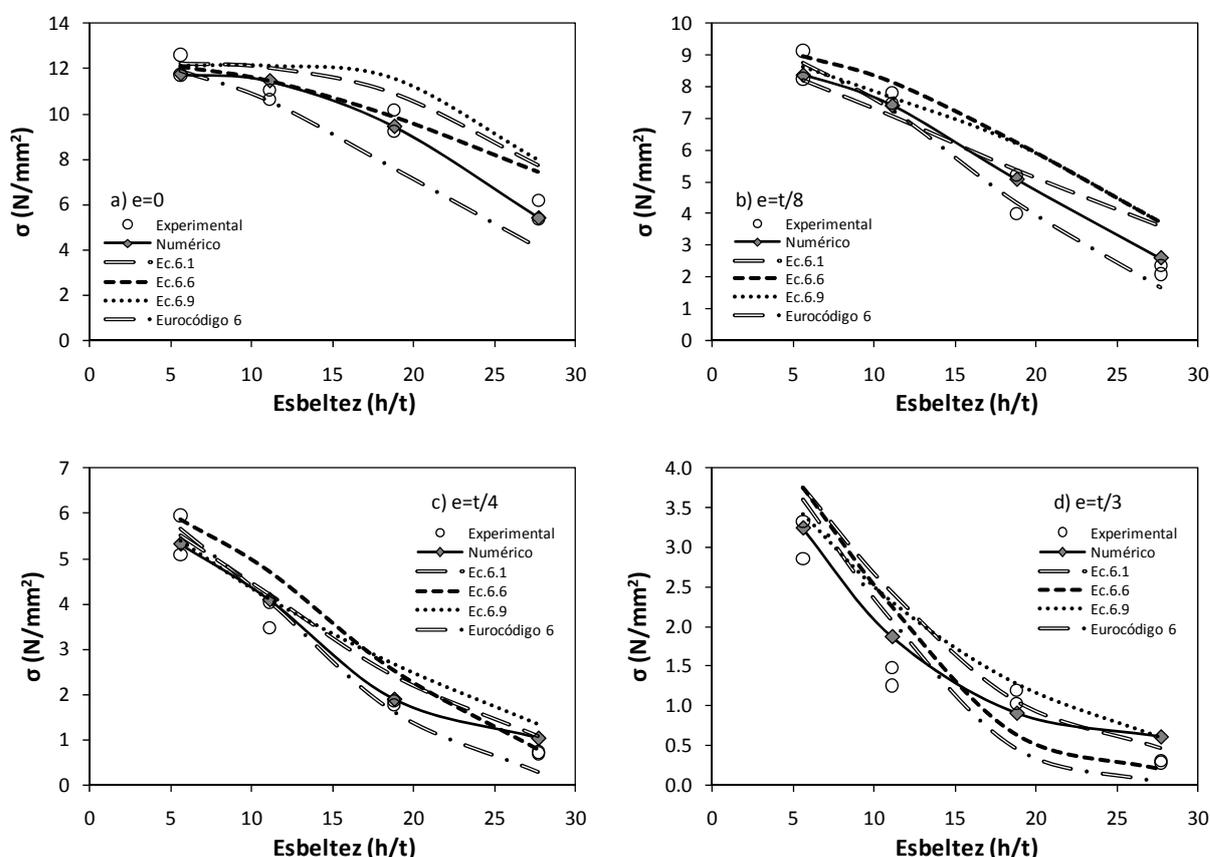


Figura 6.9 - Comparación de tensiones últimas. Fórmulas propuestas frente a datos experimentales reportados por Kirtschig y Anstötz (1991)

6.4.4. Otras campañas

Otros datos experimentales que pueden ser comparados gráficamente corresponden a aquellos reportados por Watstein y Allen (1970) y SCPRF Report N°9 (1965), ambos bajo carga concéntrica. Sin embargo, para utilizar los resultados reportados por SCPRF Report N°9 (1965) debe corregirse la altura efectiva de las paredes ya que la condición de apoyo empleada durante los experimentos fue de simple

apoyo en ambos extremos de las paredes. Para efectos de comparación, la altura efectiva se ha estimado como $0.75h$ (EN 1996-1-1:2005). Los parámetros geométricos y materiales de ambas campañas pueden ser revisados en el apartado 2.5.

La figura 6.10 muestra la comparación entre las predicciones de las fórmulas propuestas y los datos experimentales. La comparación entre las predicciones de las fórmulas 6.1, 6.6 y 6.9 y los datos experimentales reportados por Watstein y Allen (1970) es satisfactoria. En tanto, para el caso de SCPRF Report N°9 (1965), las predicciones mediante las fórmulas propuestas no logran reproducir la tendencia general de los resultados experimentales, sobreestimando la tensión para bajas esbelteces y subestimando la tensión para esbelteces elevadas. Probablemente la sola corrección de la longitud de pandeo utilizada ($0.75h$) no sea condición suficiente para evaluar la tensión última en casos con condiciones de apoyo distintas de las consideradas originalmente para obtener las formulaciones propuestas (bi-articulada). Aunque de todas formas, modificando la altura efectiva, las formulaciones ofrecen una predicción que puede considerarse bastante cercana.

Frente a los resultados experimentales reportados por Watstein y Allen (1970) y SCPRF Report N°9 (1965), las predicciones obtenidas mediante Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) vuelven a mostrarse conservadoras.

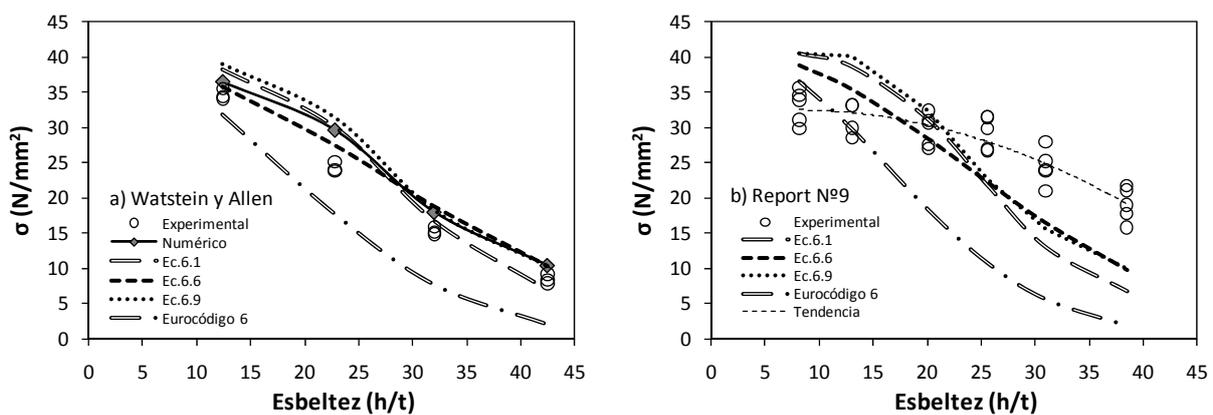


Figura 6.10 - Comparación de tensiones últimas. Fórmulas propuestas frente a datos experimentales reportados. a) Watstein y Allen (1970); b) SCPRF Report N°9 (1965)

Por otra parte, Fattal y Cattaneo (1976) y Burns (1972) llevaron a cabo ensayos sobre paredes empleando una única razón de esbeltez, pero variando la excentricidad de la carga. Las propiedades geométricas y materiales, así como los resultados obtenidos mediante las formulaciones propuestas en la presente investigación, son presentadas en la tabla 6.2. Para una mejor comparación de los resultados, éstos se presentan gráficamente en la figura 6.11.

Para los resultados de Fattal y Cattaneo (1976), las tres ecuaciones producen predicciones que sobrestiman la capacidad de carga para todas las excentricidades estudiadas, excepto para el caso $e = t/3$. Las mayores diferencias se producen aplicando la ecuación 6.9. Por el contrario, las predicciones del Eurocódigo 6 subestiman la capacidad en todas las excentricidades.

Los resultados de la campaña de Burns (1972) muestran que para $e = 0$ y $e = t/3$, las ecuaciones 6.1, 6.6 y 6.9 predicen satisfactoriamente la capacidad de carga. Sin embargo, para las excentricidades $e = t/6$ y $e = t/4$, las fórmulas subestiman la tensión última en aproximadamente un 40 y 50% respectivamente. Por su parte, las predicciones del Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) vuelven a subestimar la capacidad en todas las excentricidades.

Tabla 6.2 – Valores de tensiones experimentales y empíricas para las campañas de Fattal y Cattaneo (1976) y Burns (1972)

Campaña	f_c (N/mm ²)	Relación E/ f_c	Esbeltez h/t	Excent. e/t	σ (N/mm ²)	Ec. 6.1 (N/mm ²)	Ec. 6.6 (N/mm ²)	Ec. 6.9 (N/mm ²)	EC-6 (N/mm ²)
Fattal y Cattaneo	31.1	620	24	0	19.3	24.3	22.1	25.4	14.52
	31.1	620	24	0.083	10.3	14.6	15.7	16.2	9.40
	31.1	620	24	0.167	6.7	8.3	9.2	9.3	5.02
	31.1	620	24	0.333	1.9	1.1	0.2	1.7	0.31
Burns	8.6	325	12.1	0	7.54	8.08	7.38	8.46	6.08
	8.6	325	12.1	0.167	5.99	3.61	3.99	3.73	3.00
	8.6	325	12.1	0.250	4.27	2.11	2.17	2.08	1.64
	8.6	325	12.1	0.333	0.81	0.86	0.52	0.92	0.58

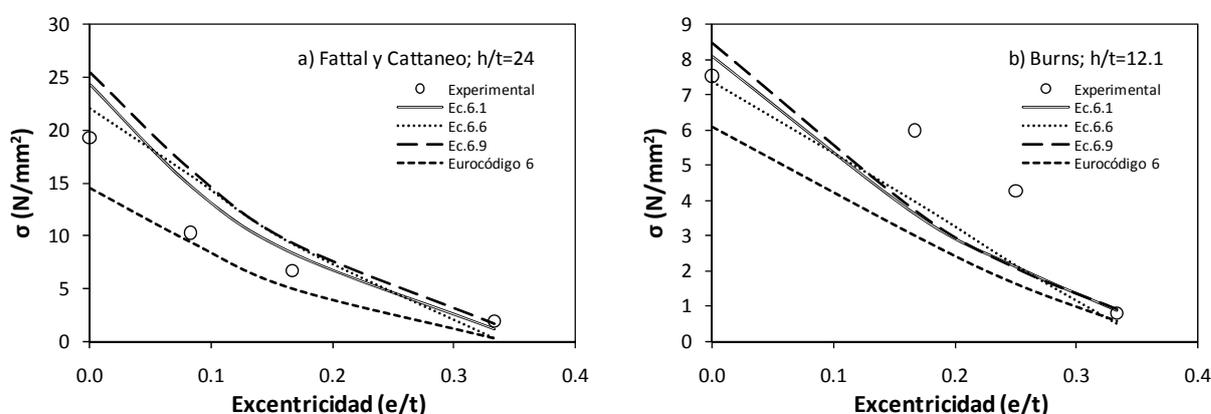


Figura 6.11 – Comparación de valores de tensiones experimentales y empíricas para las campañas de Fattal y Cattaneo (1976) y Burns (1972).

6.5. Discusión

En el presente capítulo se han presentado tres nuevas fórmulas, basadas en resultados numéricos, para determinar factores de reducción por esbeltez y excentricidad. La comparación frente a resultados experimentales disponibles se puede considerar satisfactoria. Asimismo, las comparaciones con las predicciones realizadas mediante Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) indican importantes diferencias. En general, el método propuesto por Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) predice resultados conservadores, especialmente en elementos que presentan elevada razón de esbeltez y gran excentricidad de la carga.

Las ecuaciones propuestas, que tienen un enfoque empírico, han sido obtenidas de la manera más exacta posible. No obstante, dichas fórmulas se podrían simplificar aún más, si cabe, en orden a ser incorporadas en códigos o normativas, pero probablemente a costo de perder precisión en sus resultados. Una comparación entre predicciones obtenidas mediante diferentes formulaciones simples se puede encontrar en el Anexo B.

La estrategia propuesta para obtener las fórmulas es novedosa y permite considerar aspectos relevantes en el fenómeno del pandeo que en otras formulaciones son ignorados o considerados sobre la base de aproximaciones simples. Por otra parte, se trata de un enfoque coherente en términos de propiedades materiales. Precisamente este aspecto ha sido señalado por Morton (1991) y Hendry (1998) como una de las principales deficiencias del criterio utilizado por Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005).

Cabe notar la importancia que, en estas formulaciones, conlleva determinar o estimar parámetros como la resistencia a compresión y el módulo de Young de la fábrica. Ambos parámetros deben ser estimados u obtenidos de manera rigurosa, ya que resultan fundamentales para una buena predicción de las tensiones últimas en casos prácticos de comprobación o diseño.

Finalmente, las fórmulas se han propuesto como una alternativa para obtener factores de reducción por esbeltez y excentricidad en paredes con sección rectangular y construidas con unidades macizas. Aplicaciones sobre otro tipo de secciones transversales u otros tipos de unidades no han sido estudiadas a fondo en la presente investigación.

7

Conclusiones

7.1. Conclusiones generales

La investigación realizada sobre el fallo a pandeo de muros de obra de fábrica ha puesto de manifiesto las dificultades que plantea la modelización analítica o numérica de este comportamiento, principalmente relacionadas con la consideración de la no-linealidad material y geométrica. En gran parte de los estudios previamente realizados, estas dificultades han sido superadas empleando sensibles simplificaciones y, en particular, ignorando el efecto favorable de la resistencia a tracción.

En este contexto, el uso de técnicas numéricas avanzadas ofrece una vía prometedora para el estudio de este fenómeno. Particularmente, la micro-modelización, aunque escasamente explorada en su aplicación a este problema por el momento, presenta numerosas ventajas frente a otros métodos analíticos o numéricos. En la presente investigación, su empleo sistemático ha permitido estudiar la influencia de los principales parámetros que influyen en el problema: la razón de esbeltez, la excentricidad de la carga, la rigidez y la resistencia a tracción.

La puesta a punto de un micro-modelo simplificado, debidamente calibrado en base a los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación, ha posibilitado la extensión de los resultados mencionados a una mayor diversidad de situaciones en relación a geometrías, propiedades materiales y condiciones de carga a través de un amplio estudio paramétrico.

Finalmente, el conjunto de datos numéricos generados permitió, mediante el ajuste de curvas, formular propuestas empíricas alternativas para la determinación de factores de reducción de la capacidad resistente por pandeo de muros de obra de fábrica de ladrillo.

7.2. Conclusiones específicas

A continuación se enuncian las principales conclusiones referidas a la investigación documental, al programa experimental, a la simulación numérica, al estudio paramétrico y a la propuesta de fórmulas simples desarrolladas en la presente investigación.

7.2.1. Conclusiones relativas al estado del conocimiento

- El tema referido está adquiriendo atención creciente a nivel internacional, debido a su importancia para el conocimiento de la seguridad real, especialmente ante cargas gravitatorias, del parque edificado construido en obra de fábrica. Asimismo, nuevas construcciones requieren fórmulas de diseño más coherentes con el comportamiento mecánico y material de la fábrica. En este sentido, el presente estudio ha mostrado la dificultad que plantea el tratamiento puramente analítico del problema. Prueba de ello es la amplia variedad de relaciones $\sigma - \varepsilon$ en compresión utilizadas en los trabajos disponibles en la literatura. Además, por simplicidad, la mayoría de estos trabajos ha obtenido soluciones para condiciones particulares en relación a condiciones de carga y apoyo. A pesar de ello, se han obtenido resultados teóricos relevantes.
- La mayoría de los métodos y criterios simples disponibles, incluyendo el método propuesto por Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005), no consideran la influencia de la resistencia a tracción. Esta propiedad material podría de hecho influir significativamente sobre la capacidad máxima de los muros ante el fallo por pandeo. Por consiguiente, un análisis riguroso, orientado a predecir la capacidad real de un muro, debería considerar un valor realista de la resistencia a tracción. Aunque no considerar la resistencia a tracción es conservador, su adecuada inclusión podría evitar un refuerzo realmente innecesario de cierto número de paredes portantes de edificios.
- El método propuesto en Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005), basado en la teoría de Kukulski y Lugez (1966), presenta curvas satisfactoriamente ajustadas con dicha teoría para determinar factores de reducción por esbeltez y excentricidad, pero carece de fundamento fenomenológico. Es decir, las propiedades materiales de la fábrica no quedan explícitas en el método, lo que constituye una de las principales críticas hacia el enfoque empleado por dicha normativa.
- Existe un número limitado de trabajos experimentales previos referidos al estudio del fallo por pandeo en paredes de carga de obra de fábrica. Gran parte de esta experimentación, llevada a cabo durante los años 60 y 70, ha aportado información valiosa en relación a técnicas experimentales empleadas y a resultados obtenidos. Conviene notar, sin embargo, que la evidencia experimental disponible es aún insuficiente y que, por lo tanto, es necesaria mayor experimentación junto con una descripción material y mecánica fiable, y que a su vez sea válida para llevar a cabo simulaciones numéricas.
- Aunque permiten superar varios inconvenientes relacionados con la no-linealidad material y geométrica del problema, las técnicas computacionales avanzadas han sido, por el momento, escasamente empleadas en el estudio de la respuesta fuera del plano, incluyendo el fallo por pandeo, de muros de obra de fábrica. Aunque existen estudios disponibles que presentan particular interés.

7.2.2. Conclusiones relativas a la campaña experimental

- Una serie de ensayos sobre paredes y pequeños ensamblajes construidos en obra de fábrica a escala reducida han sido ensayados hasta rotura. Los resultados experimentales obtenidos teniendo en cuenta diferentes razones de esbeltez y excentricidad de la carga, han mostrado que es posible obtener información experimental representativa y fiable sobre el comportamiento al pandeo de muros de obra de fábrica usando modelos a escala 1:4.
- En los experimentos, el uso de elementos de neopreno para lograr la condición de apoyo simple con giro permitido en ambos extremos de los muros ha proporcionado un modo simple y preciso para la determinación de la excentricidad de la carga vertical aplicada.
- Los resultados experimentales obtenidos han mostrado, como era esperable, que el incremento de la razón de esbeltez y la excentricidad de la carga presenta una fuerte influencia sobre la capacidad resistente de muros de obra de fábrica. Estos resultados han exhibido una tendencia y dispersión similar a la observada en experimentos previos. La dispersión, en estos casos, está causada principalmente por la variabilidad intrínseca de los materiales constituyentes y por pequeñas excentricidades accidentales no reportadas. También podrían atribuirse a errores en el alineamiento vertical o a pequeñas desviaciones constructivas que pueden llegar a ser muy importantes en el caso de paredes esbeltas. En cualquier caso, las diferencias en los resultados obtenidos por las campañas consideradas, incluida la desarrollada en la presente investigación, se encuentran dentro del orden de magnitud de la dispersión obtenida típicamente en este tipo de ensayos.
- Los modos de rotura observados en la presente campaña han sido coherentes con la evidencia experimental reportada por otros autores. Como era de esperar, los modos resultantes han estado claramente asociados con la excentricidad de la carga y la razón de esbeltez de los muros. Los especímenes sometidos a carga concéntrica con esbeltez igual o superior a 18 se han mostrado más propensos a fallar por inestabilidad. Este comportamiento se amplifica dramáticamente con la excentricidad de la carga.
- La comparación entre los resultados experimentales medios y resultados calculados mediante Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) ha mostrado que esta norma tiende a subestimar conservadoramente la resistencia de los muros. Esta subestimación, en la práctica, parece estar compensada mediante la consideración de un módulo de Young más elevado que el verdadero, como $E = 1000f_c$. En la presente investigación, la obra de fábrica ha exhibido un módulo elástico inicial promedio de $244f_c$. Esta proporción es similar a varias relaciones reportadas en trabajos experimentales previos. Este hecho reafirma que la relación E/f_c de la obra de fábrica de ladrillo es mucho menor que las proporciones que con frecuencia son sugeridas en diferentes códigos.

7.2.3. Conclusiones relativas a la simulación numérica

- El enfoque numérico adoptado –micro-modelización– ha ofrecido una predicción satisfactoria de los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación y otros disponibles en la literatura. Los resultados obtenidos han mostrado que el micro-modelo captura correctamente el comportamiento al pandeo, tanto en términos de capacidad resistente como en términos de deformabilidad lateral. Cabe notar que en este tipo de simulación, la apertura de junta por tracción en la interface unidad-mortero y la no-linealidad geométrica (grandes desplazamientos) han de tenerse necesariamente en cuenta para obtener resultados fiables.
- Las simulaciones llevadas a cabo mediante el micro-modelo propuesto por Lourenço y Rots (1997) han proporcionado ajustes satisfactorios para todas las campañas experimentales analizadas, con un error absoluto promedio de 12,1%. Debe notarse que algunas diferencias con respecto a los resultados

experimentales eran inevitables debido a, entre otras razones, la influencia de posibles excentricidades accidentales no reportadas.

- Con todo, el micro-modelo empleado ha mostrado su capacidad para evaluar la capacidad resistente de paredes de obra de fábrica tomando en cuenta el fallo por pandeo y se presenta como una herramienta fiable para desarrollar estudios más detallados y sistemáticos orientados a obtener formulaciones simples.

7.2.4. Conclusiones relativas al estudio paramétrico

- Mediante el micro-modelo adoptado ha sido posible realizar un detallado estudio, mediante simulaciones numéricas sistemáticas, del efecto de la variación de un amplio rango de parámetros. Este estudio estuvo dirigido a obtener información adicional y complementaria sobre el comportamiento al pandeo de paredes de obra de fábrica sometidas a carga vertical centrada y excéntrica.
- Los resultados obtenidos a partir del conjunto de simulaciones han mostrado que la razón de esbeltez, la rigidez y la excentricidad de la carga tienen gran influencia sobre la forma de las curvas de capacidad (curvas $\Phi - esbeltez$). Este hecho resultó particularmente notorio para casos con excentricidad nula. Las paredes con alta deformabilidad (baja rigidez) presentaron una disminución de la capacidad resistente más dramática y pronunciada que aquellas con rigidez más elevada.
- El parámetro adimensional $\bar{\lambda}$ ha permitido la unificación de la razón de esbeltez y la rigidez (expresada en términos de E/f_c). Esta unificación es posible y coherente con las teorías analíticas desarrolladas por algunos autores, entre los que destacan Sahlin (1959) y Kukulski y Lugez (1966). La superposición de las gráficas empleando el parámetro adimensional $\bar{\lambda}$ dio paso a curvas muy bien definidas, hecho que facilitó su tratamiento posterior.
- El estudio paramétrico también ha permitido estudiar la influencia de la resistencia a tracción. Esta característica, que habitualmente es desestimada, puede incrementar sensiblemente la capacidad de carga de una pared conforme incrementa la esbeltez y la excentricidad de la carga. Su influencia se vuelve más evidente conforme disminuye la rigidez de la pared.

7.2.5. Conclusiones relativas a las propuestas para determinar factores de reducción

- Han sido presentadas y discutidas tres fórmulas alternativas para determinar los factores de reducción por esbeltez y excentricidad. El desempeño de cada fórmula fue evaluado mediante la comparación con los resultados experimentales disponibles y otros métodos simples propuestos en la literatura.
- Como era esperable, las comparaciones entre las predicciones empleando las nuevas fórmulas y las predicciones realizadas mediante Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) han mostrado importantes diferencias. En general, el método propuesto por Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005) predice los resultados más conservadoramente, especialmente en elementos que presentan elevada razón de esbeltez y gran excentricidad de la carga.
- El empleo de las fórmulas propuestas requiere que parámetros como la resistencia a compresión y el módulo elástico de la fábrica sean estimados u obtenidos de manera rigurosa, ya que resultan fundamentales para una buena estimación de las tensiones últimas en casos prácticos de comprobación o diseño.

7.3. Líneas futuras de Investigación

Se señalan a continuación algunas futuras líneas de investigación, sugeridas a partir de la investigación realizada, que podrían complementar y ampliar el conocimiento sobre el fallo por inestabilidad de muros de obra de fábrica.

- La insuficiente cantidad de evidencia experimental reportada adecuadamente en la literatura hace de la verificación y extensión de métodos de diseño o de comprobación de muros de carga de obra de fábrica una tarea difícil. Ello es aún más evidente si se desea simular sus resultados mediante técnicas computacionales avanzadas. Esto significa que se requiere mayor cantidad de experimentación y se debe dar especial atención a obtener parámetros necesarios para alimentar las simulaciones numéricas.
- Explorar, mediante la evidencia experimental y numérica necesaria, la validez de las fórmulas propuestas en su posible aplicación a obra de fábrica construida con unidades huecas o perforadas o con bloques de hormigón. Junto con ello, también evaluar su precisión en casos de paredes construidas con unidades de diversa relación alto/ancho.
- Tal y como se ha planteado el estudio, las formulaciones solo pueden ser aplicadas a secciones rectangulares. En este sentido, la incorporación del concepto de radio de giro puede abrir la posibilidad a dar validez a las fórmulas para diferentes secciones transversales (regulares o irregulares) o incluso, en elementos no-prismáticos (más usuales de encontrar en obra de fábrica antigua).
- Estudiar más a fondo -principalmente mediante mayor experimentación- la relación que puede existir entre el módulo elástico y la resistencia a compresión para el material compuesto. Si bien es cierto en la literatura existen varias propuestas simples para su estimación, creemos que se requiere de formulaciones más precisas y fiables para estimar su correlación.
- Investigar el efecto de las paredes de traba sobre el fenómeno del pandeo. De acuerdo con Martini (1998), el estudio bidimensional de la estabilidad de paredes puede llevar a subestimar su capacidad resistente. Sin embargo, no se ha encontrado en la literatura evidencia de trabajos que investiguen este asunto.
- A partir de los modelos numéricos desarrollados en la presente investigación, generalizar el estudio a otras condiciones de contorno en relación con los apoyos. Ello, incluso, podría incluir diferentes combinaciones de excentricidad en cada uno de los extremos (combinación de excentricidad positiva y negativa).
- Investigar el valor de la excentricidad accidental. Esta excentricidad engloba imperfecciones de construcción tales como la falta de verticalidad, inclinaciones o falta de alineación entre un piso y el siguiente. En Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1:2005), estos posibles defectos quedan cubiertos asumiendo una excentricidad mínima de $0.05t$ e introduciendo una excentricidad accidental de $h/450$.
- Las ecuaciones propuestas, que tienen un enfoque empírico, han sido ajustadas de la manera más exacta posible. No obstante, se podrían estudiar futuras simplificaciones de dichas fórmulas en orden a ser incorporadas en códigos o normativas, probablemente a costo de perder algo de precisión en sus resultados.

Referencias

- [1]. **Adam, J.M.; Brencich, A.; Hughes, T.; Jefferson, T.** (2010) Micromodelling of eccentrically loaded brickwork: study of masonry wallettes. *Eng Struct* 32:1244-1251.
- [2]. **Angervo, K.** (1954) Über die Knickung und Tragfähigkeit eines exzentrisch gedrückten Pfeilers ohne Zugfestigkeit. Staatlich Technische Forschungsanstalt, Helsinki.
- [3]. **Anthoine, A.** (1992) In-plane behaviour of masonry: a literature review. Commission of the European Communities. Final Report.
- [4]. **Backes, H.P.** (1985). On the behavior of masonry under tension in the direction of the bed joints (in German). Phd Dissertation. Aachen University of Technology. Aachen. Germany.
- [5]. **Bean J.R.; Schultz A.E.; Lu M.; Stolarski H.K.; Ojard N.J.** (2008) Influence of transverse loading on the stability of slender unreinforced masonry walls. *Eng Struct* 30:2830-2839.
- [6]. **Binda, L.; Fontana, A; Frigerio, G.** (1988) Mechanical behavior of brick masonries derived from unit and mortar characteristics. Proc., 8th Int. Brick and Block Masonry Conf., Vol. 1, Dublin, Ireland, 205–216.
- [7]. **Burns, P.** (1972) Unreinforced brick masonry walls under vertical loads. Master Thesis. McGill University. Montreal.
- [8]. **Casolo, S.** (1999) Rigid element model for non-linear analysis of masonry facades subjected to out-of-plane loading. *Communications in Numerical Methods in Engineering* 15(7):457-468.
- [9]. **Cassinello, F.** (1964) Muros de carga de fábrica de ladrillo. Monografía del Instituto Eduardo Torroja. N°238.
- [10]. **Cavaleri, L.; Failla, A; La Mendola, L.; Papia, M.** (2005) Experimental and analytical response of masonry elements under eccentric vertical loads. *Eng Struct* 27:1175–1184.
- [11]. **Chapman J.C.; Slatford J.** (1957) The elastic buckling of brittle columns. *Proc. Inst. Civ. Eng.* 6, 107-125.
- [12]. **Charry, J.** (2010) Estudio experimental del comportamiento de paredes de obra de fábrica de ladrillo ante la acción de cargas laterales. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- [13]. **Colville, J.** (2001) Stability of unreinforced masonry under compressive load. *The Masonry Society Journal.* 19(1):49-56.
- [14]. **CTE-DB-SE-F** (2007) Código Técnico de la Edificación, Documento Básico, Seguridad Estructural: Fábrica. RD 1371/2007.
- [15]. **CUR** (1997) Structural masonry: a experimental/numerical basis for practical design rules. Report 171. Edited by J.G. Rots. Rotterdam. The Netherlands.
- [16]. **Da Porto, F.; Mosele, F.; Modena, C.** (2011) Cyclic out-of-plane of tall reinforced masonry walls under $P - \Delta$ effects. *Eng Struct* 33:287-297.

- [17]. **De Falco, A.; Lucchesi, M.** (2002) Stability of columns with no tension strength and bounded compressive strength and deformability. *Int J Solids Struct* 39(25):6191–6210.
- [18]. **Doherty, K.; Griffith, M.C.; Lam, N.T.K.; Wilson, J.L.** (2002) Displacement-based analysis for out-of-plane bending of seismically loaded unreinforced masonry walls. *Earthq Eng Struct D* 31(4): 833-850.
- [19]. **Drucker, D.C.; Gibson, R.E.; Henkel, D.J.** (1957) Soil mechanics and work hardening theories of plasticity. *Tr ans. ASCE*, 122 , p. 338-346.
- [20]. **Drysdale R.; Hamid H.** (1982) Effect of eccentricity on the compressive strength of brickwork. *J Brit Cer Soc* 30:140–149.
- [21]. **EHE-08** (2008) Structural Concrete Code (in Spanish). Ministerio de Fomento, Madrid, Spain.
- [22]. **EN 1015-11** (1999) Methods of test for mortar masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [23]. **EN 1052-1** (1999) Methods of test for masonry. Part 1: determination of compressive strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [24]. **EN 1996-1-1:2005** (2005) Eurocode 6. Design of masonry structures. Part 1-1: common rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [25]. **EN 772-1** (2002) Methods of test for masonry units. Part 1: Determination of the compressive strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [26]. **Fattal S.G.; Cattaneo L.E.** (1976) Structure performance of masonry walls under compression and flexure. Building Science Series 73. National Bureau of Standards, Washington, DC.
- [27]. **Frish-Fay R.** (1975) Stability of masonry piers. *Int J Solids Struct* 11(2): 187–198.
- [28]. **Frish-Fay R.** (1980) Buckling of masonry pier under its own weight. *Int J Solids Struct* 16(5): 445–450.
- [29]. **Ganduscio S.; Romano F.** (1997) FEM and analytical solutions for buckling of nonlinear masonry members. *J Struct Eng, ASCE*, 123(1):104-111.
- [30]. **Glock C.; Graubner C.** (2003) Simplified non-linear design of unreinforced walls. Darmstadt Concrete 18.
- [31]. **Glock, C.** (2004) Traglast unbewehrter beton- und mauerwerkswände. Nichtlineares berechnungsmodell und konsistentes bemessungskonzept für schlanke wände unter druckbeanspruchung. PhD Thesis. Darmstadt University. Heft 9.
- [32]. **Griffith, M.C.; Lam, N.T.K.; Wilson, J.L.; Doherty, K.** (2004) Experimental investigation of unreinforced brick masonry walls in flexure. *J Struct Eng, ASCE*, 130(3):423-432.
- [33]. **Haller, P.** (1969) Load capacity of brick masonry. In: Johnson FB (ed.) *Designing, Engineering and Constructing with Masonry Products*. Houston: Gulf Publishing Co. 129–149.
- [34]. **Hasan, S.; Hendry, A.W.** (1976) Effect of slenderness and eccentricity on the compressive strength of walls. *Proc. of the Fourth International Brick Masonry Conference (Brugge)*. Paper 4.d.3.
- [35]. **Hendry, A.W.** (1990) *Structural Masonry*. Mac Millan Education Ltd, London.

- [36]. **Hendry, A.W.** (1998) Comments on the design of masonry bearing walls according to ENV 1996-1-1. Proc. Br. Masonry Soc. 275-278.
- [37]. **Hendry, A.W.; Sinha, B.; Davies, S.** (1997) Design of masonry structures. Chapman and Hall. London.
- [38]. **Hernández, P.** (1998) Assaig en laboratori de prismes d'obra de fàbrica en pedra natural. Tesina de Especialidad. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- [39]. **Jager, W.; Bergander, H.** (1998) Comparison of buckling safety of masonry walls according to EC6 and german standards. Proc. Br. Masonry Soc. No.8, pp. 279-283.
- [40]. **Kaushik, H.B.; Rai, D.C.; Jain, S.K.** (2007) Stress-Strain Characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. J Mater Civil Eng 19(9):728-739.
- [41]. **Kirtschig, K.; Anstötz, W.** (1991) Kinckuntersuchungen an mauerwerksproben. Proceedings of 9th international brick/block masonry conference: 2002-2009.
- [42]. **Knutsson, H.** (1991) Vertical Load Bearing Masonry – The Danish Approach. J Br Mas Soc, Masonry Int 5(1):23-26.
- [43]. **Kukulski, W.; Lugez, J.** (1966) Resistance des murs en beton non arme soumis a des charges verticales. Cahiers CSTB, 79, 1.
- [44]. **La Mendola, L.** (1997) Influence of nonlinear constitutive law on masonry pier stability. J Struct Eng, ASCE, 123(10):1303-1311.
- [45]. **La Mendola, L.; Papia, M.** (1993) Stability of masonry piers under their own weight and eccentric load. J Struct Eng, ASCE, 119(6):1678-1693.
- [46]. **La Mendola, L.; Papia, M.; Zingone, G.** (1995) Stability of masonry walls subjected to seismic transverse forces. J Struct Eng, ASCE, 121(11):1581-1587.
- [47]. **Lobato, M.** (2009) Método simple para el análisis de muros de obra de fábrica con aberturas bajo solicitaciones en su plano. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- [48]. **Lourenço P.B.; Rots J.G.** (1997) Multisurface interface model for analysis of masonry structures. J Eng Mech 123(7):660-668.
- [49]. **Lourenço, P.B.** (1996a) Computational strategies for masonry structures. PhD Thesis, Delft University of Technology. Delft. The Netherlands.
- [50]. **Lourenço, P.B.** (1996b) A user/programmer's guide for the micro-modeling of masonry structures. TU Delft, Report N°03.21.1.31.35. Delft University of Technology, Delft. The Netherlands.
- [51]. **Lourenço, P.B.; Pina-Henriquez, J.** (2006) Validation of analytical and continuum numerical methods for estimating the compressive strength of masonry. Comp Str 84:1977-1989.
- [52]. **Lourenço, P.B.; Oliveira, D.V.; Roca, P.; Orduña, A.** (2005) Dry joint stone masonry walls subjected to in-plane combined loading. J Struct Eng, ASCE, 131(11):1665-1673.
- [53]. **Lu, M.** (2003) Stability of unreinforced masonry members under simultaneous vertical and out-of-plane lateral loads. PhD dissertation. University of Minnesota. USA.
- [54]. **Lu, M.; Schultz, A.E.; Stolarski, H.K.** (2004) Analysis of the influence of tensile strength on the stability of eccentrically compressed slender unreinforced masonry walls under lateral loads. J Struct Engr 130(6):921-933.

- [55]. **Mann, W.; Müller, H.** (1982) Failure of shear-stressed masonry – An enlarged theory, tests and application to shear walls. Proc. of the British Ceramic Society. 223-235.
- [56]. **Mann, W.** (1991) Basics of design of masonry walls subjected to vertical loads and buckling according to the present draft of Eurocode EC-6 and comparison with experimental data. Brick and Block Masonry. 3:1281-1291.
- [57]. **Martínez, J.L.** (2003) Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicación al análisis de construcciones históricas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- [58]. **Martínez, J.L.; Martín-Caro, J.A; León, J.** (2001) Comportamiento mecánico de la obra de fábrica. Monografías sobre el análisis estructural de construcciones históricas de fábrica. Monografía E.T.S. Ingenieros Caminos, Canales y Puertos UPM, Madrid, España.
- [59]. **Martini, K.** (1997) Finite element studies in the out-of-plane failure of unreinforced masonry. In: Proceedings of the international conference on computing in civil and building engineering. Vol.1. Choi CK, editor. Korea.
- [60]. **Martini, K.** (1998) Ancient structures and modern analysis: investigating damage and reconstruction at Pompeii. Autom Constr; 8(1):125-137.
- [61]. **Masonry Standards Joint Committee (MSJC)** (2005) Building code requirements for masonry structures. ACI 530/ASCE 5/TMS 402, USA.
- [62]. **McNary, W.S.; Abrams, D.P.** (1985) Mechanics of masonry in compression. J Struct Eng, ASCE, 11(4):857-870.
- [63]. **Molins, C.** (1996) Characterization of the mechanical behaviour of masonry. Structural Analysis of Historical Constructions. Editor: P. Roca, CIMNE, Barcelona.
- [64]. **Moreno, R.** (2006) Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- [65]. **Morton, J.** (1990) The design of masonry compression members. British Masonry Society Proceeding N° 4. 106-111.
- [66]. **Morton, J.** (1991) An alternative approach to reduction factors for the design of solid masonry walls. Proc. 9th Int. Brick/Block Masonry Conf. Eds. H.Glitza & K.Göbel. pp. 758-766.
- [67]. **Mura, I.** (2008) Stability of nonlinear masonry members under combined load. Comput Struct 86(15-16):1579-1593.
- [68]. **Naraine, K.; Sinha, S.** (1989) Behaviour of brick masonry under cyclic compressive loading. J Struct Eng 115(6):1432-1445.
- [69]. **Ojinaga, J.** (1976) The ultimate strength of load-bearing brick and block masonry walls. Master Thesis. McGill University. Montreal.
- [70]. **Ojinaga, J.; Turkstra, C.** (1980) The design of plain masonry walls. Can J Civil Eng 7(2):233-242.
- [71]. **Oliveira, D.V.** (2002) Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loadings. PhD Thesis. Escola de Engenharia. Universidade de Minho. Portugal.
- [72]. **Page A.W.** (1983) The strength of brick masonry under biaxial tension compression. International Journal of Masonry Construction. 3(1):26-31.

- [73]. **Page, A.W.** (1981) The biaxial compressive strength of brick masonry. Proc Instn Civ Engrs, Part 2, Vol. 71, pp. 893-906.
- [74]. **Page, A.W.; Sparkes, D.R.** (1994) Evaluation of the effective eccentricity for masonry walls loaded in compression. Research Report 098.05. University of Newcastle. UK.
- [75]. **Paquette, J.; Bruneau, M.** (2003) Pseudo-dynamic testing of unreinforced masonry building with flexible diaphragm. J Struct Engr 129(6):708-716.
- [76]. **Payne, D.C.; Brooks, D.S.; Sved, G.** (1990) The analysis and design of slender brick walls. Masonry Int. 4(2):55-65.
- [77]. **Pelà, L.** (2009) Continuum damage model for nonlinear analysis of masonry structures. PhD Thesis. Technical University of Catalonia. University of Ferrara. Italy.
- [78]. **PIET 70** (1971) Obras de fábrica. Prescripciones del Instituto Eduardo Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- [79]. **Roca, P.; Cervera, M.; Pelà, L.; Gariup, G.** (2010) Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. Arch Comput Method Eng 17(3):299-325.
- [80]. **Romano, F.; Ganduscio, S.; Zingone, G.** (1993) Cracked nonlinear masonry stability under vertical and lateral loads. J Struct Eng, ASCE, 119(1):69-87.
- [81]. **Romano, F.; Ganduscio, S.; Zingone, G.** (1992) Stability of masonry with nonlinear stress-strain relationship. Masonry Int., 6(2):69-74.
- [82]. **Rosas, J.; Villegas, L.; Lorenzo, D.** (2001) Los modelos numéricos frente al comportamiento de elementos de fábrica ensayados en laboratorio. Informes de la Construcción, Vol. 53, No 474.
- [83]. **Sahlin, S.** (1965) Diagrams of critical stress for columns of material without tensile strength. Report No. 16/25. Swedish National Institute for Building Research.
- [84]. **Samarasinghe, W.; Hendry, A. W.** (1980). Strength of brickwork under biaxial stress. Proc. 7th Int. Symp. Loadbearing Brickwork, Londres, British Ceramic Society.
- [85]. **Samarasinghe, W.; Page, A.W.; Hendry, A.W.** (1982). A finite element model for the in plane behaviour of brickwork. Proc. Inst. Civ. Eng., Vol. 71, No. 2, pp. 171-178.
- [86]. **Sandoval, C.; Roca, P.; Bernat, E.; Gil, Ll.** (2011) Testing and numerical modelling of buckling failure of masonry walls. Constr Build Mater (available online).
- [87]. **Sarangapani, G.; Reddy, B.V.; Jagadish, K.S.** (2002) Structural characteristics of bricks, mortars and masonry. J Struct Eng, ASCE, 29(2):101-107.
- [88]. **Schultz, A.E.** (1999) Stability of unreinforced masonry (URM) compression members under out-of-plane lateral loads. Proceedings of the 1999 Structures Congress held in New Orleans, Louisiana, April 18-19. 121-124.
- [89]. **Schultz, A.E.; Mueffelman, J.G.** (1999) Design aspects for stability of masonry walls under out-of-plane loading. Proceedings, the Eighth North American Masonry Conference, Austin, Texas.
- [90]. **Schultz, A.E.; Mueffelman, J.G.; Ojard, N.J.** (2000) Critical axial loads for transversely loaded masonry walls. 12th Int. Brick/Block Masonry Conf. Proc. Vol.III; Madrid; pp. 1633-1646.
- [91]. **Silva, W.P.; Silva, C.M.D.P.S.** (2010) LAB Fit Curve Fitting Software (Nonlinear Regression and Treatment of Data Program) V7.2.48 (1999-2011), online, available from world wide web: www.labfit.net.

- [92]. **Sinha, B.P.; Maurenbrecher, H.P.; Hendry, A.W.** (1971) Model and full-scale tests on a fivestorey cross-wall structure under lateral loading. Proceedings of the Second International Brick Masonry Conference. UK.
- [93]. **Structural Clay Products Research Foundation, SCPRF** (1965) Compressive, transverse and racking strength tests of four-inch brick walls. Research Report No. 9. Geneva. Illinois.
- [94]. **Tassios, T.** (1988) *Meccanica delle Murature*. Liguori Editore. Napoli. Italy.
- [95]. **Tesfaye, E.; Broome, T.H.** (1977) Effect of weight on stability of masonry walls. *J Struct Div, ASCE*, 103(5):961-970.
- [96]. **TNO Diana** (2005) DIANA-Finite Element Analysis. The Netherlands.
- [97]. **Tomažević, M.** (1987). Dynamic modelling of masonry buildings: Storey mechanism model as a simple alternative. *Earthq Eng Struct D* 15:731-749.
- [98]. **Turkstra, C.** (1970) Resistencia de muros de mampostería ante cargas verticales excéntricas. Informe No 274, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- [99]. **Turnsek, V.; Cacovic, F.** (1971) Some experimental results on the strength of brick masonry walls. Proc. Of the 2nd International Brick Masonry Conference.
- [100]. **Van der Pluijm, R.** (1997) Non-linear behavior of masonry under tension. *Heron*, 42(1):25-54.
- [101]. **Van der Pluijm, R.** (1999) Out-of-plane bending of masonry. Behaviour and strength. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology. The Netherlands.
- [102]. **Vermeltfoort, A.T.** (2005) Brick-mortar interaction in masonry under compression in masonry under compression. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology. The Netherlands.
- [103]. **Viviescas, A.** (2009) Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- [104]. **Watstein, D.; Allen, M.H.** (1970) Structural performance of clay masonry assemblages built with high-bond organic-modified mortars. Second International Brick Masonry Conference. 99-112.
- [105]. **Weihe, S.; Kroplin, B.; De Borst, R.** (1998). Classification of smeared crack models based on material and structural properties *Int J Solids Struct* 35:1289-1308.
- [106]. **Wesche, K.; Lantzis, A.** (1980) General recommendations for methods of testing load bearing walls. *Mater Struct, RILEM*, 13(78):433-445.
- [107]. **Willis, C.R.** (2004) Design of unreinforced masonry walls for out-of-plane loading. PhD Thesis, School of Civil Engineering, The University of Adelaide. Australia.
- [108]. **Yokel, F.Y.** (1971) Stability and load capacity of members with no tensile strength. *J Struct Div, ASCE*, 97(7):1913-1926.

Anexo A

Simulaciones mediante macro-modelización

El método de los elementos finitos ofrece una amplia variedad de posibilidades con respecto a la descripción de estructuras de obra de fábrica en el marco del análisis no-lineal detallado. En este contexto, la macro-modelización probablemente sea el enfoque más común para analizar grandes elementos estructurales (fachadas, arcos, etc.) o estructuras completas construidas en obra de fábrica. En este enfoque no se realiza distinción entre unidades y juntas de mortero -como ocurre en la micro-modelización- y la obra de fábrica se trata como un continuo homogéneo ficticio.

Como ya fue comentado en el capítulo 4, la macro-modelización también podría ser utilizada para analizar el problema del pandeo en paredes de obra de fábrica. Sin embargo, un inconveniente que presenta este enfoque reside en la descripción del daño como una propiedad distribuida en el continuo de la estructura. Este hecho no resulta coherente con el modo de rotura típicamente observado en pandeo de muros de obra de fábrica, donde el daño se produce de manera muy localizada a través de la apertura de una junta horizontal a media altura del elemento.

A pesar de ello, una simulación que incluya fisuración distribuida puede entregar una descripción aproximada del daño, como asimismo una predicción razonable de la capacidad de carga. Además, comparado con el enfoque numérico utilizado en el capítulo 4, los macro-modelos muestran mayores ventajas prácticas, principalmente relativas a la generación del mallado y la asignación de propiedades materiales para el modelo.

Para evaluar la precisión y fiabilidad del enfoque de macro-modelización frente al pandeo, sólo se han tenido en cuenta los resultados obtenidos en la campaña experimental desarrollada como parte de esta investigación.

Configuración y mallado

La modelización numérica se realizó considerando un modelo 2D en tensión plana. Los análisis, al igual que en la micro-modelización reportada en el capítulo 4, fueron llevados a cabo empleando control por desplazamiento, considerando no-linealidad geométrica.

La condición de apoyo articulado en las simulaciones también fue modelada mediante elementos triangulares rígidos ubicados en ambos extremos y a cuyos vértices se les permitió libre rotación. En aquellos casos bajo carga concéntrica se consideró una excentricidad mínima de 1 mm en orden a tomar en cuenta posibles irregularidades en la geometría del muro. Cabe notar, que una excentricidad mínima también es necesaria para activar la respuesta no-lineal (no-linealidad geométrica).

En las simulaciones, las paredes fueron modeladas usando elementos continuos de 4 nodos. En el sentido del espesor de la pared se dispuso un total de 12 elementos. La figura A.1 muestra la configuración y mallado típico usado en las simulaciones.

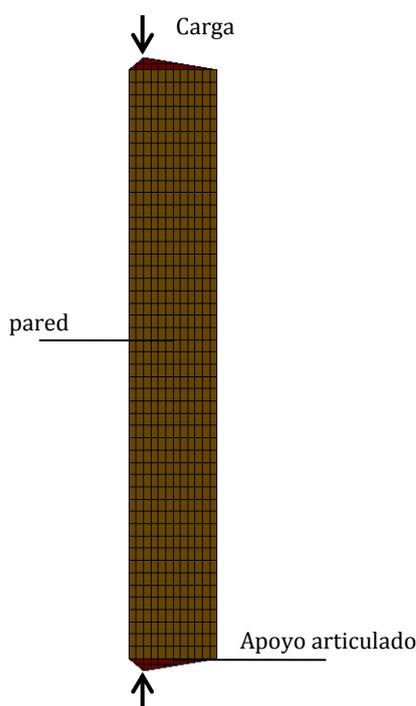


Figura A.1 – Configuración y mallado típico

Criterios de fluencia

Para que la modelización sea representativa del comportamiento real de la fábrica es de suma importancia la elección de criterios de fluencia conforme a los mecanismos de rotura observados en la experimentación. Una combinación de criterios que suele emplearse en un análisis a macro nivel de materiales cuasi-frágiles –como lo son las estructuras de obra de fábrica– es, por un lado, el modelo de daño distribuido (*smearred cracking*, Weihe *et al.*, 1998) para el régimen a tracción del material, y por otro, el modelo de plasticidad de Drucker-Prager, propuesto inicialmente por Drucker *et al.* (1957), para el régimen a compresión del material.

Los análisis se realizaron empleando el software DIANA (TNO Diana, 2005).

Propiedades para el macro-modelo

Los parámetros necesarios para el macro-modelo son: las propiedades elásticas de la fábrica caracterizadas por el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, la resistencia a compresión de la fábrica f_c , la resistencia a tracción de la fábrica f_t , la energía de fractura G_f^I (modo I) y los parámetros requeridos por el criterio de Drucker-Prager, $sen\phi$, $sen\psi$ y la cohesión \bar{c} .

Para el módulo de Young, la resistencia a compresión y la resistencia a tracción se han adoptado los valores experimentales medios reportados en el capítulo 3 (campana experimental). La energía de fractura en modo I fue estimada como el 10% de la resistencia a tracción. La cohesión se ajustado a través de la siguiente expresión:

$$\bar{c} = f_c \frac{1 - \text{sen}\phi}{2\text{cos}\phi} \quad [\text{A.1}]$$

En la expresión anterior, ϕ corresponde al ángulo de fricción interna. En este tipo de análisis, este ángulo adopta un valor típico de 10° , lo que representa una relación de 1.16 entre la máxima resistencia a compresión biaxial y la resistencia a compresión uniaxial.

La tangente del ángulo de dilatancia ψ se define con un valor muy cercano a cero en acuerdo con las recomendaciones en CUR (1997). La tabla A.1 resume las propiedades empleadas en el modelo.

Tabla A.1 – Propiedades de la fábrica para el macro-modelo

Propiedad	Valor
E	3458 N/mm ²
v	0.15
f_c	14.2 N/mm ²
f_t	0.55 N/mm ²
G_f'	0.055 Nmm/mm ²
\bar{c}	5.96 N/mm ²
sen ϕ	0.17
sen ψ	0.09

Comparación entre resultados experimentales y numéricos

La figura A.2 presenta una comparación entre las tensiones de rotura experimentales obtenidas en la presente investigación y las tensiones últimas obtenidas mediante micro-modelización y macro-modelización.

Tal y como puede apreciarse, la comparación entre las curvas tensión-esbeltez muestran resultados semejantes entre micro-modelación y macro-modelación. De hecho, las diferencias entre las tensiones máximas de rotura entre una aplicación numérica y otra son mínimas. En este sentido, particularmente destacable es la similitud observada para el caso de excentricidad $e = t/3$. Sin embargo, para el caso de excentricidad nula, el macro-modelo sobreestima la capacidad resistente de la pared para los casos de esbeltez 6.8 y 12.6.

El error absoluto promedio para los resultados numéricos obtenidos mediante macro-modelización es de 17.3%. Aunque cabe notar que, gran parte de este error promedio se debe a errores calculados en casos de esbeltez elevada donde los valores absolutos son muy pequeños. De todas formas, el macro-modelo, al igual que el micro-modelo de Lourenço y Rots (1997), predice de manera satisfactoria las tensiones de rotura con un error típicamente reportado para este tipo de simulaciones.

La figura A.3 presenta los diagramas tensión-deflexión lateral para las razones de esbeltez 18.7 y 25.6. Como se observa, ambos enfoques -micro-modelización y macro-modelización- muestran curvas similares, aunque este último presenta una mayor deformabilidad para los casos de $e = t/3$.

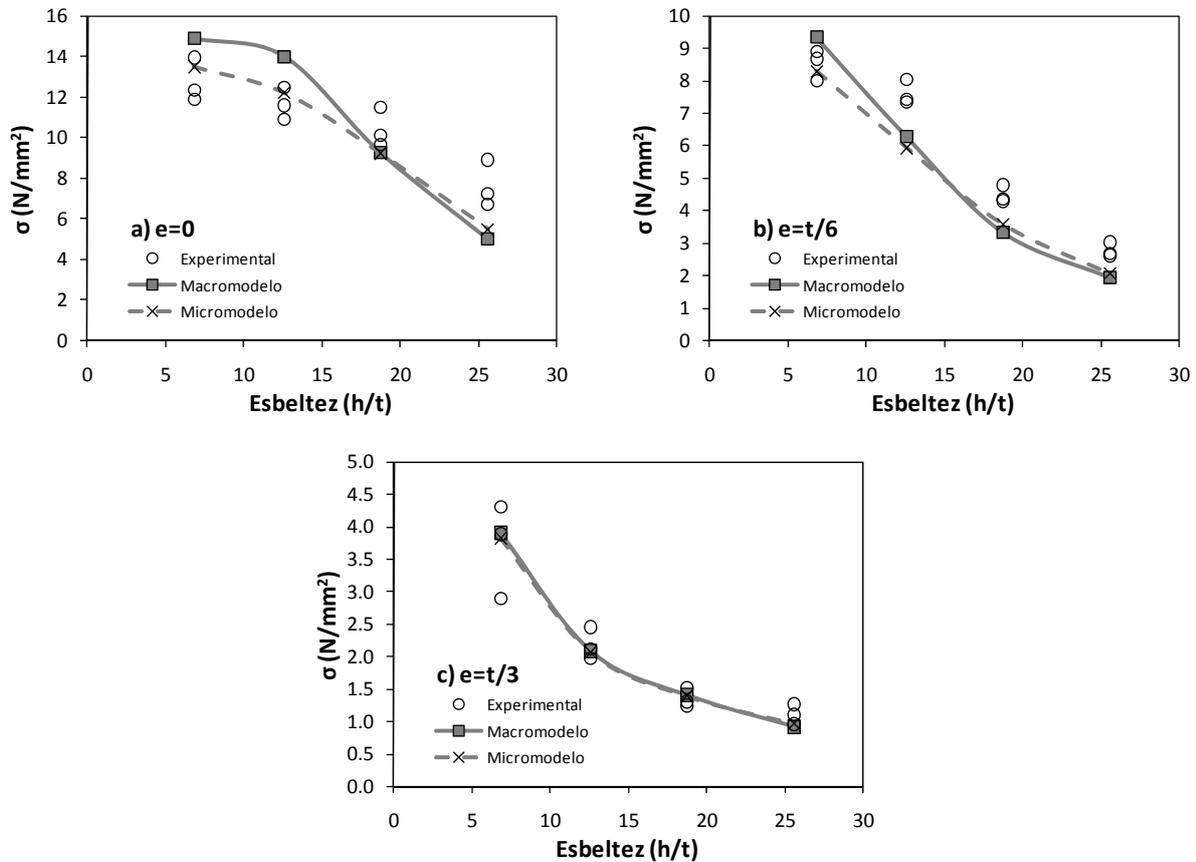


Figura A.2 - Comparación entre tensiones últimas experimentales y tensiones obtenidas mediante micro-modelización y macro-modelización

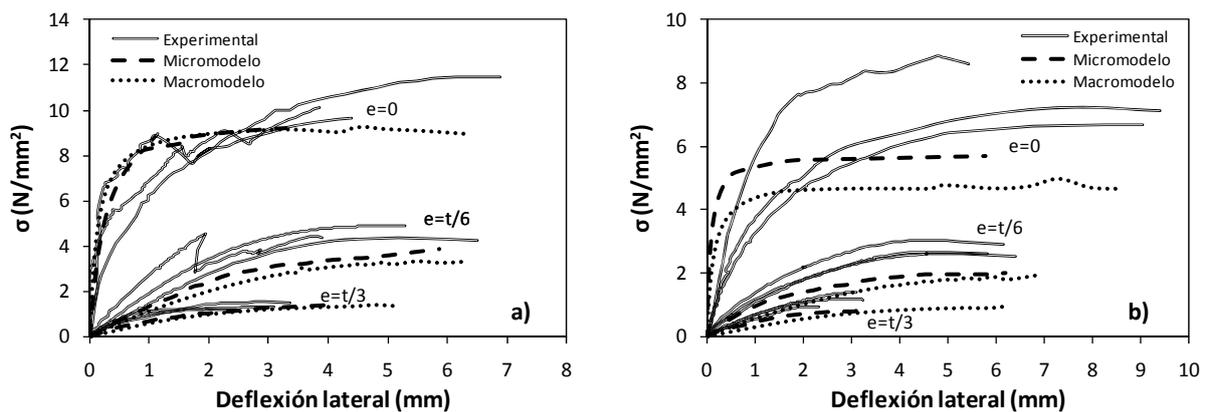


Figura A.3 - Comparación diagramas tensión-deflexión lateral: a) esbeltez 18.7; b) esbeltez 25.6

Las figuras A.4, A.5, A.6 y A.7 muestran una representación de la deformada en rotura (correspondiente al último paso de carga), junto con las tensiones principales de compresión. En estas figuras se puede apreciar el gradiente de tensiones que se presenta en la pared de acuerdo con la excentricidad de la carga (lado izquierdo bajo tensiones de compresión, lado derecho bajo tensiones de tracción). De ello, se desprende que todos los modelos con excentricidad $e = t/6$ y $e = t/3$ fallan por inestabilidad lateral (pandeo). Esto resulta coherente con los modos experimentales de fallo reportados en el capítulo 3.

Las figuras A.8, A.9 y A.10 confirman, a través de los estados de fisuración, lo que se infiere de los estados tensionales. Sin embargo, ocurre que para el caso de esbeltez 18.6 y $e = 0$, el modelo no indica fallo por inestabilidad como sí ocurrió en los experimentos. Ello podría deberse a que la excentricidad accidental considerada en los análisis es insuficiente y en la realidad las paredes presentaron una imperfección mayor a 1 mm.

Discusión

Las simulaciones realizadas mediante macro-modelización entregan ajustes satisfactorios frente a los resultados experimentales analizados, con un error promedio absoluto de 17.3%. Aunque el error obtenido es ligeramente superior al obtenido mediante el micro-modelo propuesto por Lourenço y Rots (1997), este enfoque también muestra buena capacidad para evaluar la capacidad resistente de muros de obra de fábrica sometidos a carga vertical concéntrica y excéntrica. Cabe notar que este enfoque ya ha sido utilizado anteriormente por Lu (2003) para evaluar la estabilidad de paredes sometidas a cargas laterales perpendiculares al plano con resultados satisfactorios.

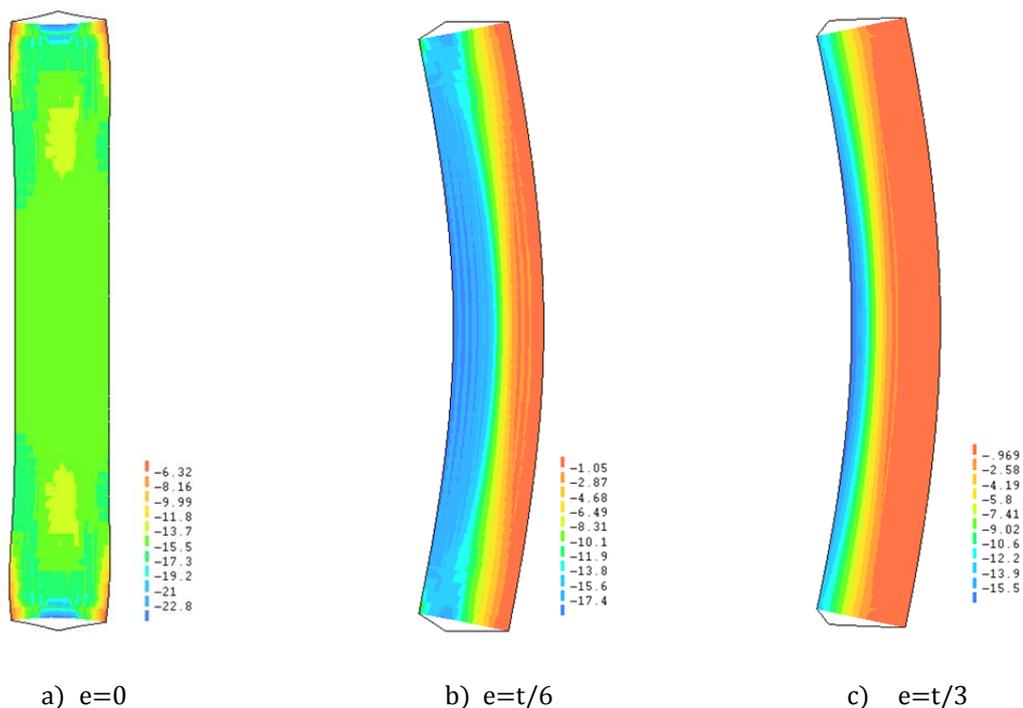


Figura A.4 - Esbeltez 6.8: Tensiones principales de compresión [N/mm^2] en rotura y deformada

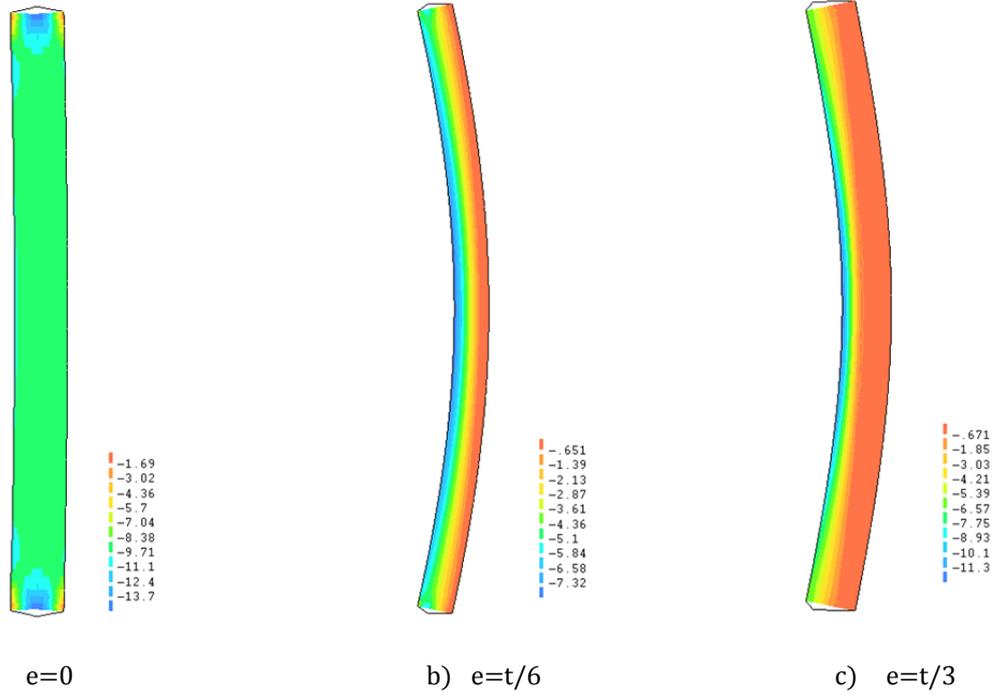


Figura A.5 - Esbeltez 12.6: Tensiones principales de compresión $[N/mm^2]$ en rotura y deformada

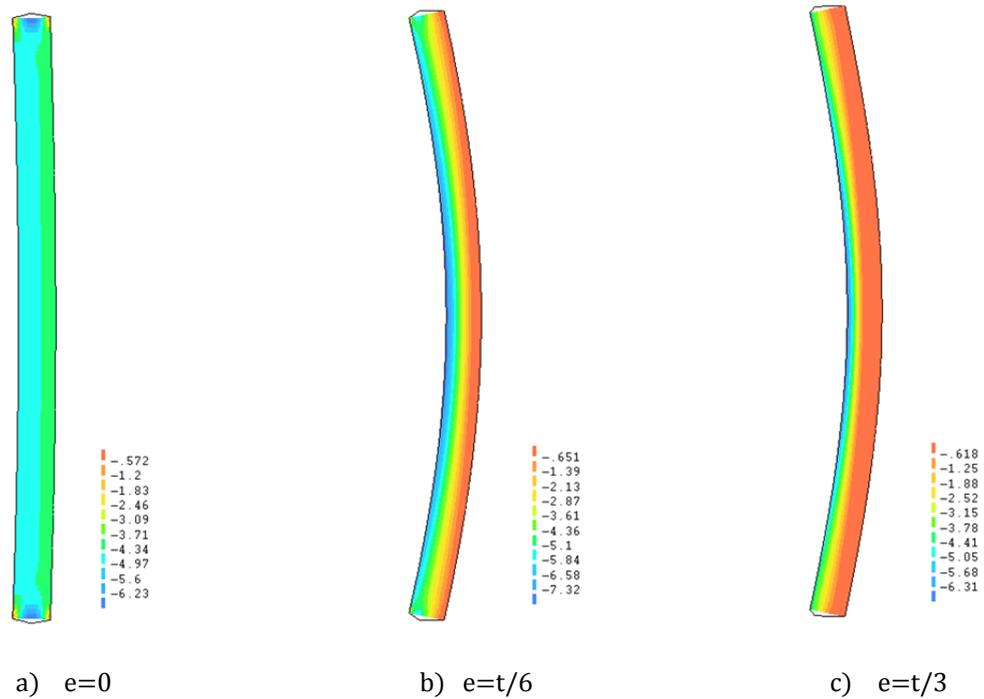


Figura A.6 - Esbeltez 18.7: Tensiones principales de compresión $[N/mm^2]$ en rotura y deformada

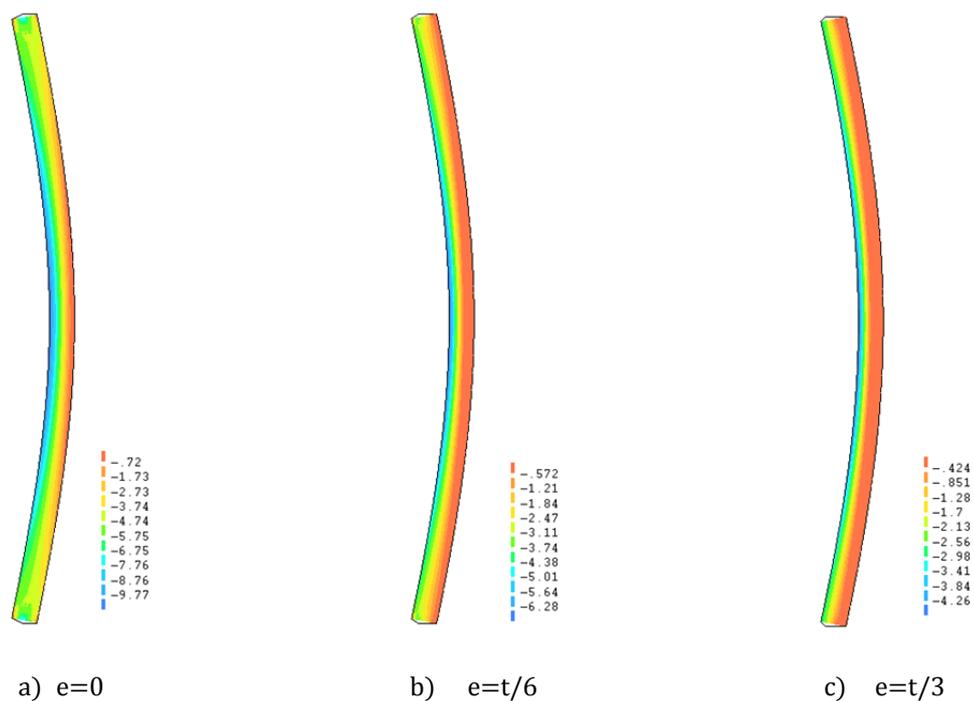


Figura A.7 - Esbeltez 25.6: Tensiones principales de compresión [N/mm²] en rotura y deformada

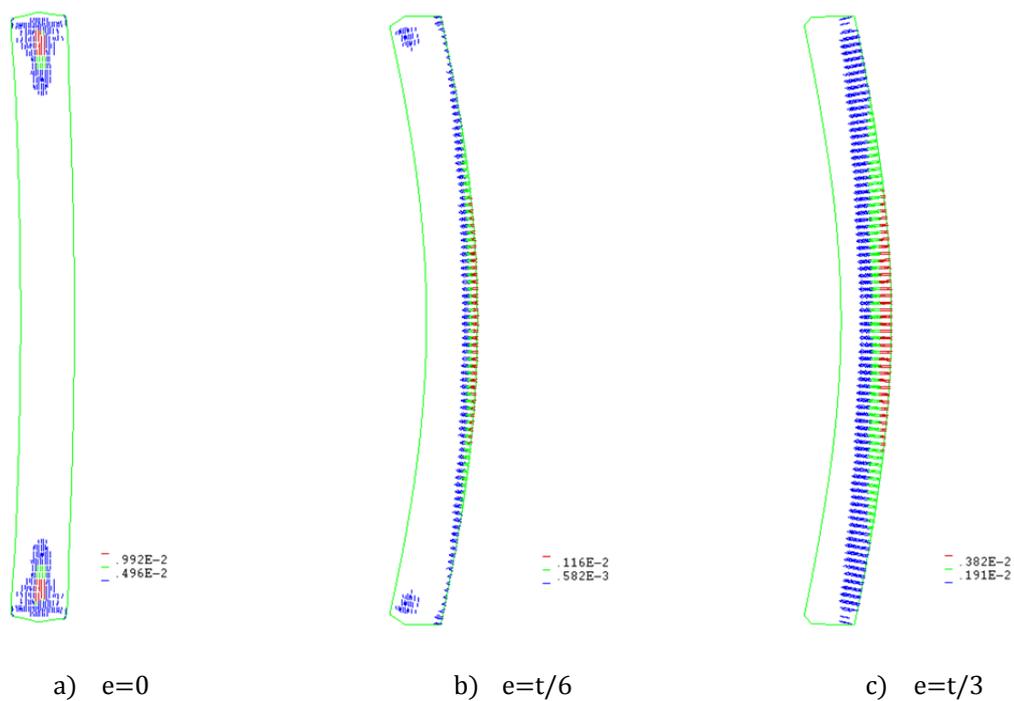


Figura A.8 - Esbeltez 12.6: Fisuración en rotura y deformada

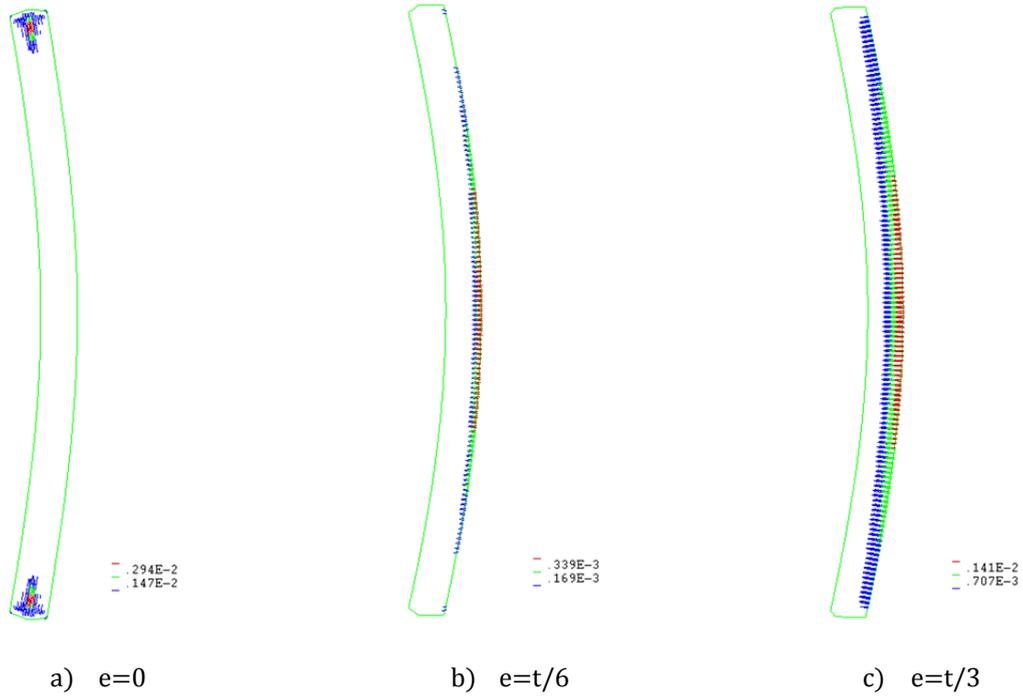


Figura A.9 - Esbeltez 18.7: Fisuración en rotura y deformada

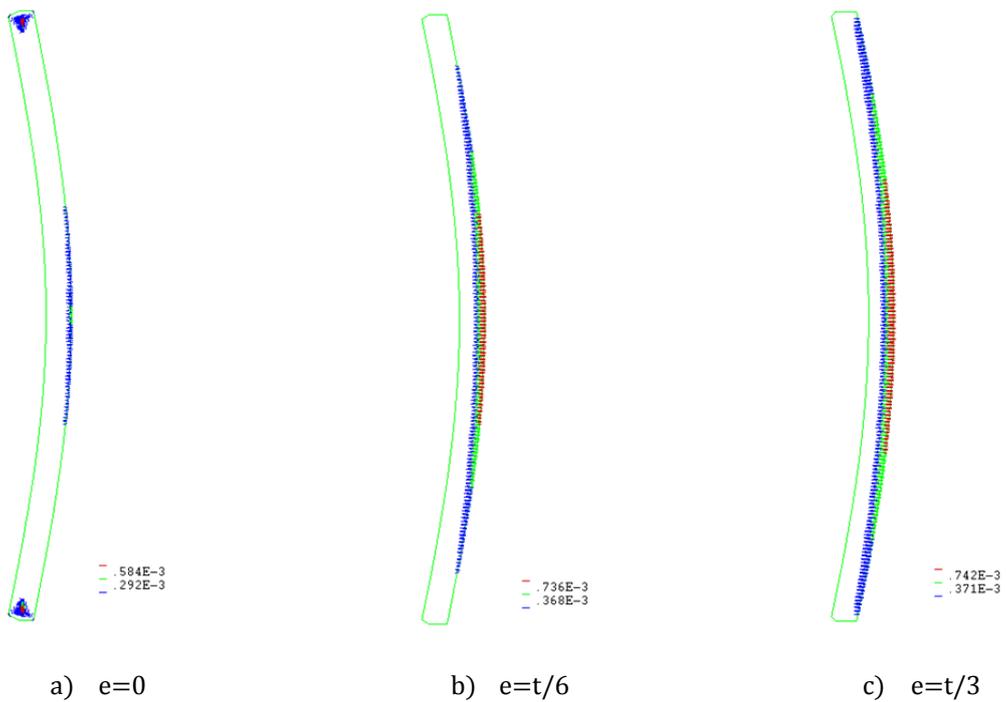


Figura A.10 - Esbeltez 25.6: Fisuración en rotura y deformada

Anexo B

Cálculos utilizando métodos simples

En el presente anexo se evalúan y comparan las predicciones de tensión última obtenidas mediante la Ecuación 6.9 y los métodos simples propuestos por Morton (1990); Knutsson (1991); Glock y Graubner (2003); Lu (2003) y Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1: 2005). Cada uno de estos métodos simples fue revisado y comentado en el apartado 2.4.

Para llevar a cabo la comparación se emplean los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación y aquellos reportados por Hasan y Hendry (1976) y Kirtschig y Anstötz (1991).

Con respecto a la aplicación de cada método simple, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

Método de Morton (1990)

Para estimar el parámetro δ se ha empleado, en cada caso, el valor real de la relación E/f_c y no 900 como sugiere el método.

Método de Knutsson (1991)

Se adoptó $k_t = 0$ en todos los cálculos.

Método de Glock y Graubner (2003)

Se adoptó $k_0 = 2$ y $\varepsilon_f = 1/(E/f_c)$. Donde la relación E/f_c adoptó, en cada caso, el valor de la relación real.

Método de Lu (2003)

En los cálculos con este método no se ha tenido en cuenta la contribución de la resistencia a tracción.

Método de Eurocódigo 6 (EN 1996-1-1: 2005)

Para la aplicación de este método, el factor de seguridad parcial γ_M ha sido considerado igual a 1, mientras que no se ha considerado la excentricidad debido al creep y la excentricidad accidental.

Comparación de resultados

La comparación entre los resultados experimentales medios y los resultados calculados con cada método se presenta en las figuras B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 y B.6.

Como puede ser observado, la mayoría de los métodos tiende a subestimar conservadoramente la tensión última de los muros. Esta subestimación parece aumentar con la razón de esbeltez y la excentricidad de la carga, aunque existe alguna excepción.

En general, el método de Morton (1990) tiende a subestimar la resistencia de los muros para excentricidad nula, mientras que para excentricidades elevadas ($e \geq 0.25t$) tiende a sobrestimar la resistencia. Un comportamiento similar presenta el método propuesto por Knutsson (1991), que además sobrestima considerablemente la resistencia de los muros en casos con baja esbeltez ($h/t \leq 10$) y excentricidad mayor a $t/8$.

El método de Glock y Graubner (2003) predice valores que, en general, muestran coherencia con la tendencia experimental. Sin embargo, el método no es capaz de reproducir la tendencia experimental mostrada en los casos con elevada excentricidad, donde incluso el método llega a predecir valores negativos después de una cierta esbeltez.

El método propuesto por Lu (2003) presenta el mejor ajuste frente a los resultados medios experimentales entre los métodos simples previos disponibles en la literatura. Globalmente, este método reproduce satisfactoriamente la tendencia mostrada por los resultados experimentales.

Para propósitos de comparación, errores medios absolutos han sido obtenidos y comparados de acuerdo con cada método. El resumen de estos resultados se presenta en la tabla B.1.

Los menores errores medios absolutos se producen para las ecuaciones 6.1, 6.6 y 6.9, propuestas en la presente investigación, y para el método propuesto por Lu (2003). El error promedio absoluto para estos casos se ubica entre el 21% y el 24%, siendo la ecuación 6.1 la que presenta un menor error y una menor desviación estándar. Cabe notar además que las tres ecuaciones propuestas en la presente investigación presentan una desviación estándar inferior (menor al 10%) en comparación con la desviación estándar mostrada por los otros métodos, para los casos experimentales analizados.

Tabla B.1 – Comparación general entre métodos simples

Campaña	PROPUESTAS			MORTON	KNUTSSON	GLOCK/GRAUBNER	LU	EUROCODE 6
	Ec. 6.1	Ec. 6.6	Ec. 6.9	[1990]	[1991]	[2003]	[2003]	[2005]
Presente Inv.	26.8%	32.6%	24.5%	24.0%	33.0%	88.4%	18.7%	60.5%
Hasan/Hendry (1976)	13.7%	15.3%	11.9%	41.0%	28.4%	38.7%	8.9%	37.7%
Kirtschig/Anstötz (1991)	24.4%	24.1%	30.8%	97.6%	64.7%	62.8%	41.7%	25.9%
Errores medios absolutos	21.6%	24.0%	22.4%	54.2%	42.0%	63.3%	23.1%	41.4%
Desviación Estándar	7.0%	8.7%	9.6%	38.5%	19.8%	24.8%	16.8%	17.6%

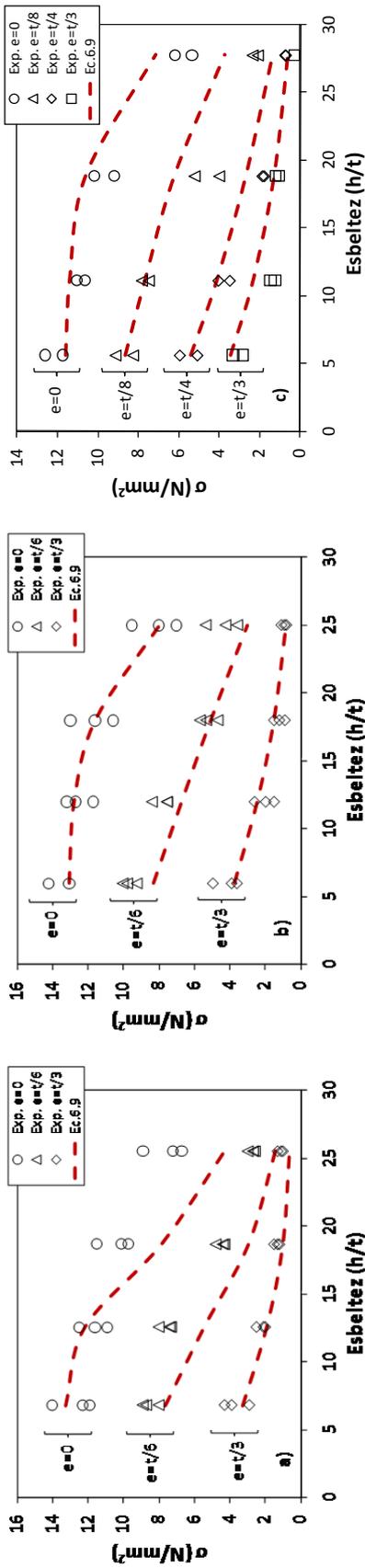


Figura B.1 – Comparación de resultados experimentales y predicciones usando la Ecuación 6.9: a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)

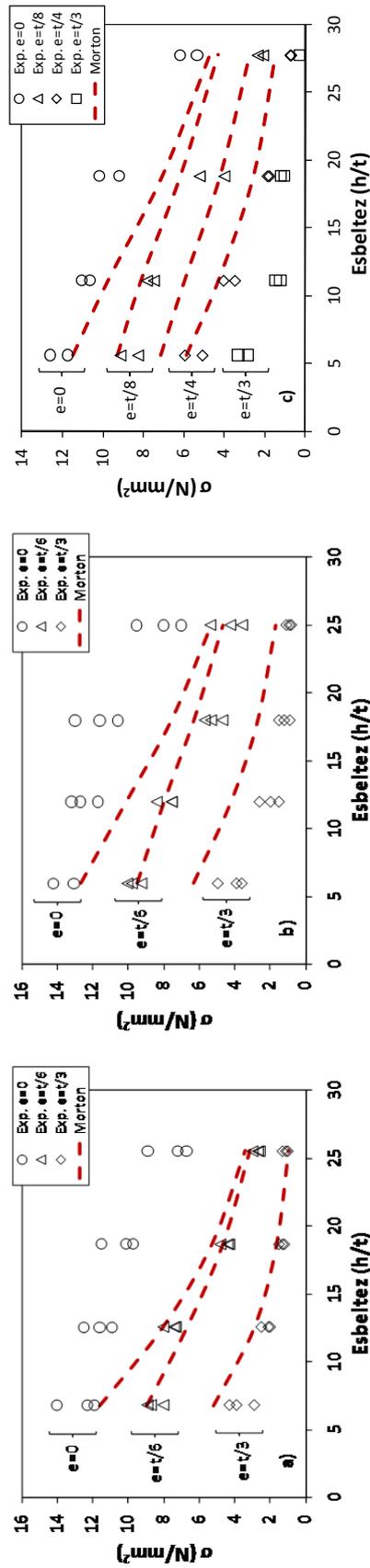


Figura B.2 – Comparación de resultados experimentales y predicciones usando el método de Morton (1990): a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)

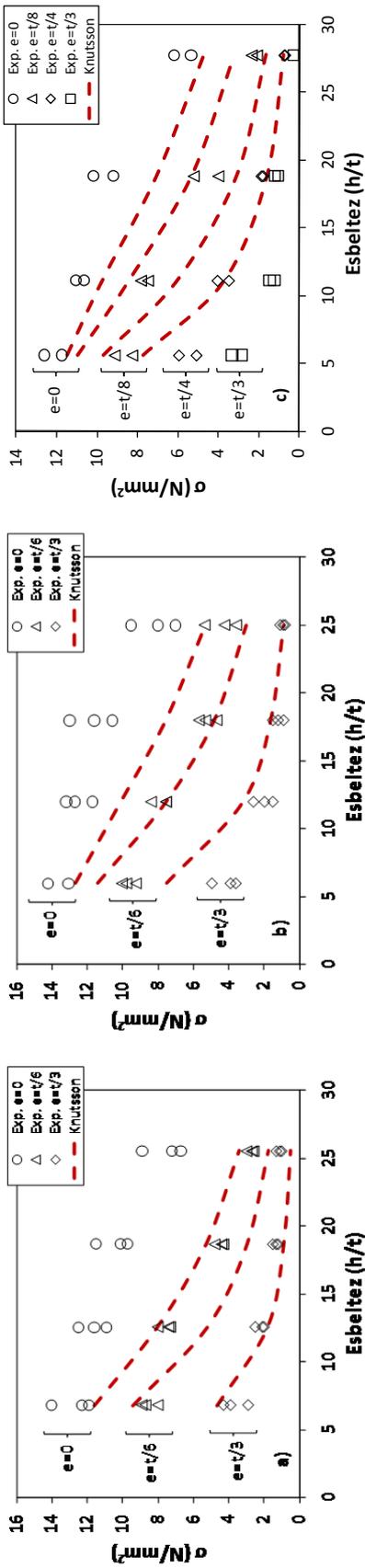


Figura B.3 – Comparación de resultados experimentales y predicciones usando el método de Knutsson (1991): a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)

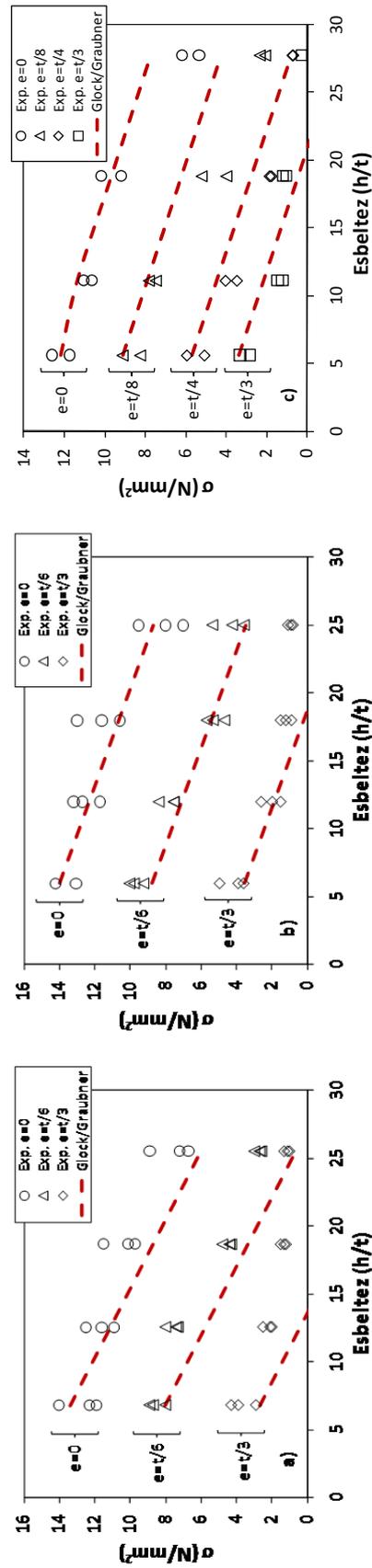


Figura B.4 – Comparación de resultados experimentales y predicciones usando el método de Glock y Graubner (2003): a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)

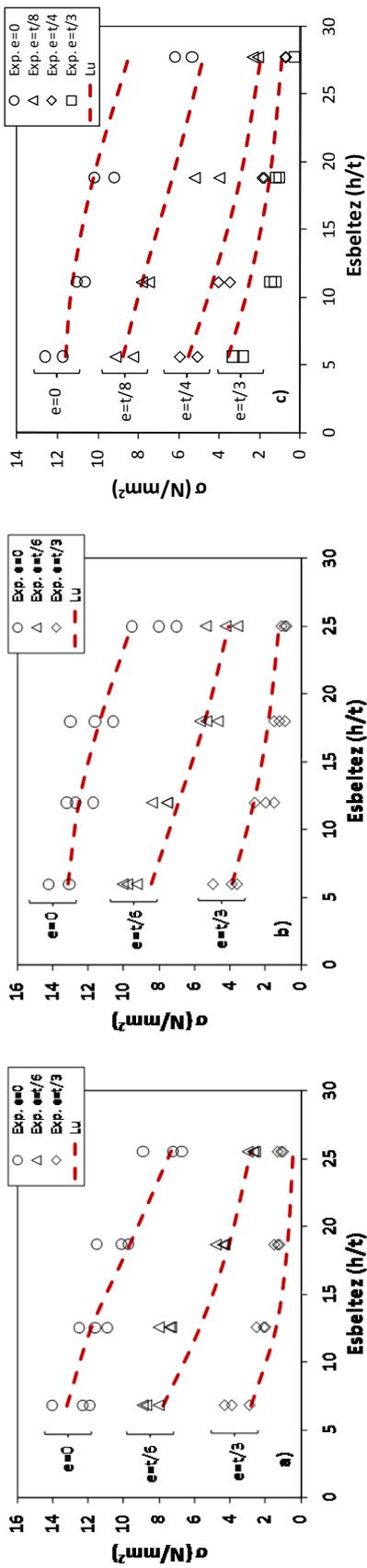


Figura B.5 - Comparación de resultados experimentales y predicciones usando el método de Lu (2003): a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)

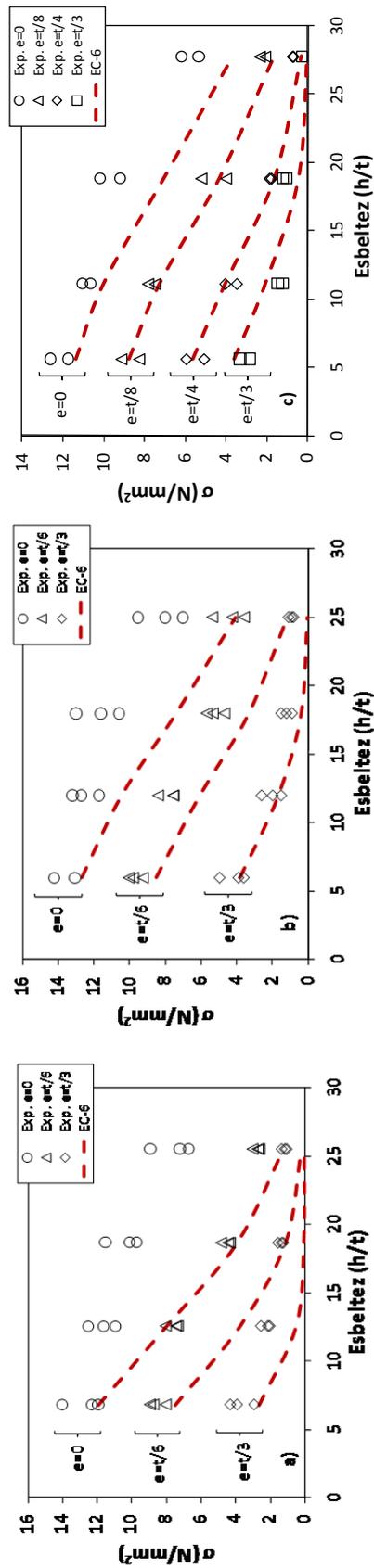


Figura B.6 - Comparación de resultados experimentales y predicciones usando el método de Eurocódigo 6 (2005): a) presente investigación; b) Hasan y Hendry (1976); c) Kirtschig y Anstötz (1991)

Apéndice A

Tabla: Resultados numéricos generales

h/t	e/t	f _c	k _n	f _b	E/f _c	σ/f _c														
5	0	0.001	560	960	60	0.98	5	0	1.13	1400	2400	160	1.00	5	0.1	0.568	2800	4080	320	0.74
5	0	0.001	980	1680	112	0.98	5	0	1.13	1960	3360	215	1.00	5	0.1	0.568	3360	5760	380	0.75
5	0	0.001	1400	2400	160	1.00	5	0	1.13	2380	4080	251	1.00	5	0.1	0.568	3920	6720	440	0.75
5	0	0.001	1960	3360	215	1.00	5	0	1.13	2800	4080	320	1.00	5	0.1	0.568	4900	8400	550	0.76
5	0	0.001	2380	4080	251	1.00	5	0	1.13	3360	5760	380	1.00	5	0.1	0.568	5880	10080	650	0.78
5	0	0.001	2800	4080	320	1.00	5	0	1.13	3920	6720	440	1.00	5	0.1	0.568	8120	13920	900	0.79
5	0	0.001	3360	5760	380	1.00	5	0	1.13	4900	8400	550	1.00	5	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.80
5	0	0.001	3920	6720	440	1.00	5	0	1.13	5880	10080	650	1.00	5	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.78
5	0	0.001	4900	8400	550	1.00	5	0	1.13	8120	13920	900	1.00	5	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.83
5	0	0.001	5880	10080	650	1.00	5	0	1.13	10500	18000	1200	1.00	5	0.1	0.852	560	960	60	0.62
5	0	0.001	8120	13920	900	1.00	5	0	1.13	11620	19920	1320	1.00	5	0.1	0.852	980	1680	112	0.69
5	0	0.001	10500	18000	1200	1.00	5	0	1.13	13020	22320	1480	1.00	5	0.1	0.852	1400	2400	160	0.71
5	0	0.001	11620	19920	1320	1.00	5	0	1.42	560	960	60	0.98	5	0.1	0.852	1960	3360	215	0.73
5	0	0.001	13020	22320	1480	1.00	5	0	1.42	980	1680	112	0.98	5	0.1	0.852	2380	4080	251	0.74
5	0	0.284	560	960	60	0.98	5	0	1.42	1400	2400	160	1.00	5	0.1	0.852	2800	4080	320	0.74
5	0	0.284	980	1680	112	0.98	5	0	1.42	1960	3360	215	1.00	5	0.1	0.852	3360	5760	380	0.74
5	0	0.284	1400	2400	160	1.00	5	0	1.42	2380	4080	251	1.00	5	0.1	0.852	3920	6720	440	0.75
5	0	0.284	1960	3360	215	1.00	5	0	1.42	2800	4080	320	1.00	5	0.1	0.852	4900	8400	550	0.76
5	0	0.284	2380	4080	251	1.00	5	0	1.42	3360	5760	380	1.00	5	0.1	0.852	5880	10080	650	0.77
5	0	0.284	2800	4080	320	1.00	5	0	1.42	3920	6720	440	1.00	5	0.1	0.852	8120	13920	900	0.79
5	0	0.284	3360	5760	380	1.00	5	0	1.42	4900	8400	550	1.00	5	0.1	0.852	8120	13920	900	0.79
5	0	0.284	3920	6720	440	1.00	5	0	1.42	5880	10080	650	1.00	5	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.81
5	0	0.284	4900	8400	550	1.00	5	0	1.42	8120	13920	900	1.00	5	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.78
5	0	0.284	5880	10080	650	1.00	5	0	1.42	8120	13920	900	1.00	5	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.81
5	0	0.284	8120	13920	900	1.00	5	0	1.42	10500	18000	1200	1.00	5	0.1	1.13	560	960	60	0.63
5	0	0.284	10500	18000	1200	1.00	5	0	1.42	11620	19920	1320	1.00	5	0.1	1.13	980	1680	112	0.69
5	0	0.284	11620	19920	1320	1.00	5	0	1.42	13020	22320	1480	1.00	5	0.1	1.13	1400	2400	160	0.73
5	0	0.284	13020	22320	1480	1.00	5	0.1	0.001	560	960	60	0.63	5	0.1	1.13	1960	3360	215	0.73
5	0	0.568	560	960	60	0.98	5	0.1	0.001	980	1680	112	0.69	5	0.1	1.13	2380	4080	251	0.74
5	0	0.568	980	1680	112	0.98	5	0.1	0.001	1400	2400	160	0.71	5	0.1	1.13	2800	4080	320	0.74
5	0	0.568	1400	2400	160	1.00	5	0.1	0.001	1960	3360	215	0.73	5	0.1	1.13	3360	5760	380	0.75
5	0	0.568	1960	3360	215	1.00	5	0.1	0.001	2380	4080	251	0.74	5	0.1	1.13	3920	6720	440	0.76
5	0	0.568	2380	4080	251	1.00	5	0.1	0.001	2800	4080	320	0.74	5	0.1	1.13	4900	8400	550	0.78
5	0	0.568	2800	4080	320	1.00	5	0.1	0.001	3360	5760	380	0.75	5	0.1	1.13	5880	10080	650	0.78
5	0	0.568	3360	5760	380	1.00	5	0.1	0.001	3920	6720	440	0.75	5	0.1	1.13	8120	13920	900	0.79
5	0	0.568	3920	6720	440	1.00	5	0.1	0.001	4900	8400	550	0.77	5	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.81
5	0	0.568	4900	8400	550	1.00	5	0.1	0.001	5880	10080	650	0.77	5	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.78
5	0	0.568	5880	10080	650	1.00	5	0.1	0.001	8120	13920	900	0.80	5	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.82
5	0	0.568	8120	13920	900	1.00	5	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.81	5	0.1	1.42	560	960	60	0.64
5	0	0.568	10500	18000	1200	1.00	5	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.78	5	0.1	1.42	980	1680	112	0.69
5	0	0.568	11620	19920	1320	1.00	5	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.82	5	0.1	1.42	1400	2400	160	0.74
5	0	0.568	13020	22320	1480	1.00	5	0.1	0.284	560	960	60	0.66	5	0.1	1.42	1960	3360	215	0.73
5	0	0.852	560	960	60	0.98	5	0.1	0.284	980	1680	112	0.69	5	0.1	1.42	2380	4080	251	0.74
5	0	0.852	980	1680	112	0.98	5	0.1	0.284	1400	2400	160	0.71	5	0.1	1.42	2800	4080	320	0.74
5	0	0.852	1400	2400	160	1.00	5	0.1	0.284	1960	3360	215	0.73	5	0.1	1.42	3360	5760	380	0.75
5	0	0.852	1960	3360	215	1.00	5	0.1	0.284	2380	4080	251	0.74	5	0.1	1.42	3920	6720	440	0.76
5	0	0.852	2380	4080	251	1.00	5	0.1	0.284	2800	4080	320	0.74	5	0.1	1.42	4900	8400	550	0.78
5	0	0.852	2800	4080	320	1.00	5	0.1	0.284	3360	5760	380	0.75	5	0.1	1.42	5880	10080	650	0.77
5	0	0.852	3360	5760	380	1.00	5	0.1	0.284	3920	6720	440	0.75	5	0.1	1.42	8120	13920	900	0.79
5	0	0.852	3920	6720	440	1.00	5	0.1	0.284	4900	8400	550	0.77	5	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.81
5	0	0.852	4900	8400	550	1.00	5	0.1	0.284	5880	10080	650	0.77	5	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.79
5	0	0.852	5880	10080	650	1.00	5	0.1	0.284	8120	13920	900	0.80	5	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.81
5	0	0.852	8120	13920	900	1.00	5	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.80	5	0.2	0.001	560	960	60	0.41
5	0	0.852	10500	18000	1200	1.00	5	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.78	5	0.2	0.001	980	1680	112	0.48
5	0	0.852	11620	19920	1320	1.00	5	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.80	5	0.2	0.001	1400	2400	160	0.51
5	0	0.852	13020	22320	1480	1.00	5	0.1	0.568	560	960	60	0.62	5	0.2	0.001	1960	3360	215	0.53
5	0	1.13	560	960	60	0.98	5	0.1	0.568	980	1680	112	0.69	5	0.2	0.001	2380	4080	251	0.54
5	0	1.13	980	1680	112	0.98	5	0.1	0.568	1400	2400	160	0.71	5	0.2	0.001	2800	4080	320	0.55
							5	0.1	0.568	1960	3360	215	0.73	5	0.2	0.001	3360	5760	380	0.56
							5	0.1	0.568	2380	4080	251	0.74	5	0.2	0.001	3920	6720	440	0.57

5	0.2	0.001	4900	8400	550	0.57	5	0.2	1.42	2380	4080	251	0.56	5	0.3	1.13	560	960	60	0.18
5	0.2	0.001	5880	10080	650	0.58	5	0.2	1.42	2800	4080	320	0.56	5	0.3	1.13	980	1680	112	0.28
5	0.2	0.001	8120	13920	900	0.58	5	0.2	1.42	3360	5760	380	0.57	5	0.3	1.13	1400	2400	160	0.34
5	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.58	5	0.2	1.42	3920	6720	440	0.58	5	0.3	1.13	1960	3360	215	0.37
5	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.58	5	0.2	1.42	4900	8400	550	0.60	5	0.3	1.13	2380	4080	251	0.39
5	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.61	5	0.2	1.42	5880	10080	650	0.58	5	0.3	1.13	2800	4080	320	0.40
5	0.2	0.284	560	960	60	0.43	5	0.2	1.42	8120	13920	900	0.60	5	0.3	1.13	3360	5760	380	0.40
5	0.2	0.284	980	1680	112	0.61	5	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.60	5	0.3	1.13	3920	6720	440	0.41
5	0.2	0.284	1400	2400	160	0.51	5	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.58	5	0.3	1.13	4900	8400	550	0.41
5	0.2	0.284	1960	3360	215	0.54	5	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.60	5	0.3	1.13	5880	10080	650	0.42
5	0.2	0.284	2380	4080	251	0.54	5	0.3	0.001	560	960	60	0.16	5	0.3	1.13	8120	13920	900	0.43
5	0.2	0.284	2800	4080	320	0.55	5	0.3	0.001	980	1680	112	0.25	5	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.44
5	0.2	0.284	3360	5760	380	0.56	5	0.3	0.001	1400	2400	160	0.29	5	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.42
5	0.2	0.284	3920	6720	440	0.57	5	0.3	0.001	1960	3360	215	0.33	5	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.41
5	0.2	0.284	4900	8400	550	0.57	5	0.3	0.001	2380	4080	251	0.34	5	0.3	1.42	560	960	60	0.17
5	0.2	0.284	5880	10080	650	0.57	5	0.3	0.001	2800	4080	320	0.35	5	0.3	1.42	980	1680	112	0.27
5	0.2	0.284	8120	13920	900	0.59	5	0.3	0.001	3360	5760	380	0.36	5	0.3	1.42	1400	2400	160	0.36
5	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.59	5	0.3	0.001	3920	6720	440	0.37	5	0.3	1.42	1960	3360	215	0.40
5	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.59	5	0.3	0.001	4900	8400	550	0.37	5	0.3	1.42	2380	4080	251	0.39
5	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.60	5	0.3	0.001	5880	10080	650	0.38	5	0.3	1.42	2800	4080	320	0.40
5	0.2	0.568	560	960	60	0.41	5	0.3	0.001	8120	13920	900	0.38	5	0.3	1.42	3360	5760	380	0.41
5	0.2	0.568	980	1680	112	0.47	5	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.39	5	0.3	1.42	3920	6720	440	0.42
5	0.2	0.568	1400	2400	160	0.55	5	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.39	5	0.3	1.42	4900	8400	550	0.42
5	0.2	0.568	1960	3360	215	0.54	5	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.40	5	0.3	1.42	5880	10080	650	0.43
5	0.2	0.568	2380	4080	251	0.54	5	0.3	0.284	560	960	60	0.17	5	0.3	1.42	8120	13920	900	0.44
5	0.2	0.568	2800	4080	320	0.55	5	0.3	0.284	980	1680	112	0.29	5	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.44
5	0.2	0.568	3360	5760	380	0.56	5	0.3	0.284	1400	2400	160	0.31	5	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.42
5	0.2	0.568	3920	6720	440	0.57	5	0.3	0.284	1960	3360	215	0.34	5	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.41
5	0.2	0.568	4900	8400	550	0.57	5	0.3	0.284	2380	4080	251	0.35	7	0	0.001	560	960	60	0.76
5	0.2	0.568	5880	10080	650	0.58	5	0.3	0.284	2800	4080	320	0.36	7	0	0.001	980	1680	112	0.99
5	0.2	0.568	8120	13920	900	0.58	5	0.3	0.284	3360	5760	380	0.37	7	0	0.001	1400	2400	160	1.00
5	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.59	5	0.3	0.284	3920	6720	440	0.38	7	0	0.001	1960	3360	215	1.00
5	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.61	5	0.3	0.284	4900	8400	550	0.39	7	0	0.001	2380	4080	251	1.00
5	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.60	5	0.3	0.284	5880	10080	650	0.39	7	0	0.001	2800	4080	320	1.00
5	0.2	0.852	560	960	60	0.43	5	0.3	0.284	8120	13920	900	0.39	7	0	0.001	3360	5760	380	1.00
5	0.2	0.852	980	1680	112	0.50	5	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.40	7	0	0.001	3920	6720	440	1.00
5	0.2	0.852	1400	2400	160	0.53	5	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.40	7	0	0.001	4900	8400	550	1.00
5	0.2	0.852	1960	3360	215	0.54	5	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.41	7	0	0.001	5880	10080	650	1.00
5	0.2	0.852	2380	4080	251	0.55	5	0.3	0.568	560	960	60	0.19	7	0	0.001	8120	13920	900	0.99
5	0.2	0.852	2800	4080	320	0.55	5	0.3	0.568	980	1680	112	0.27	7	0	0.001	10500	18000	1200	1.00
5	0.2	0.852	3360	5760	380	0.56	5	0.3	0.568	1400	2400	160	0.30	7	0	0.001	11620	19920	1320	1.00
5	0.2	0.852	3920	6720	440	0.57	5	0.3	0.568	1960	3360	215	0.33	7	0	0.001	13020	22320	1480	1.00
5	0.2	0.852	4900	8400	550	0.57	5	0.3	0.568	2380	4080	251	0.37	7	0	0.284	560	960	60	0.76
5	0.2	0.852	5880	10080	650	0.58	5	0.3	0.568	2800	4080	320	0.36	7	0	0.284	980	1680	112	0.99
5	0.2	0.852	8120	13920	900	0.59	5	0.3	0.568	3360	5760	380	0.37	7	0	0.284	1400	2400	160	1.00
5	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.59	5	0.3	0.568	3920	6720	440	0.38	7	0	0.284	1960	3360	215	1.00
5	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.60	5	0.3	0.568	4900	8400	550	0.39	7	0	0.284	2380	4080	251	1.00
5	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.60	5	0.3	0.568	5880	10080	650	0.39	7	0	0.284	2800	4080	320	1.00
5	0.2	1.13	560	960	60	0.43	5	0.3	0.568	8120	13920	900	0.42	7	0	0.284	3360	5760	380	1.00
5	0.2	1.13	980	1680	112	0.48	5	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.42	7	0	0.284	3920	6720	440	1.00
5	0.2	1.13	1400	2400	160	0.52	5	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.42	7	0	0.284	4900	8400	550	1.00
5	0.2	1.13	1960	3360	215	0.57	5	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.41	7	0	0.284	5880	10080	650	1.00
5	0.2	1.13	2380	4080	251	0.56	5	0.3	0.852	560	960	60	0.16	7	0	0.284	8120	13920	900	0.99
5	0.2	1.13	2800	4080	320	0.56	5	0.3	0.852	980	1680	112	0.28	7	0	0.284	10500	18000	1200	1.00
5	0.2	1.13	3360	5760	380	0.57	5	0.3	0.852	1400	2400	160	0.29	7	0	0.284	11620	19920	1320	1.00
5	0.2	1.13	3920	6720	440	0.58	5	0.3	0.852	1960	3360	215	0.34	7	0	0.284	13020	22320	1480	1.00
5	0.2	1.13	4900	8400	550	0.58	5	0.3	0.852	2380	4080	251	0.39	7	0	0.568	560	960	60	0.76
5	0.2	1.13	5880	10080	650	0.59	5	0.3	0.852	2800	4080	320	0.36	7	0	0.568	980	1680	112	0.99
5	0.2	1.13	8120	13920	900	0.60	5	0.3	0.852	3360	5760	380	0.39	7	0	0.568	1400	2400	160	1.00
5	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.61	5	0.3	0.852	3920	6720	440	0.38	7	0	0.568	1960	3360	215	1.00
5	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.60	5	0.3	0.852	4900	8400	550	0.39	7	0	0.568	2380	4080	251	1.00
5	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.60	5	0.3	0.852	5880	10080	650	0.39	7	0	0.568	2800	4080	320	1.00
5	0.2	1.42	560	960	60	0.42	5	0.3	0.852	8120	13920	900	0.42	7	0	0.568	3360	5760	380	1.00
5	0.2	1.42	980	1680	112	0.48	5	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.42	7	0	0.568	3920	6720	440	1.00
5	0.2	1.42	1400	2400	160	0.52	5	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.42	7	0	0.568	4900	8400	550	1.00
5	0.2	1.42	1960	3360	215	0.55	5	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.41	7	0	0.568	5880	10080	650	1.00

7	0	0.568	8120	13920	900	0.99	7	0.1	0.284	3360	5760	380	0.72	7	0.2	0.001	1400	2400	160	0.41
7	0	0.568	10500	18000	1200	1.00	7	0.1	0.284	3920	6720	440	0.73	7	0.2	0.001	1960	3360	215	0.46
7	0	0.568	11620	19920	1320	1.00	7	0.1	0.284	4900	8400	550	0.74	7	0.2	0.001	2380	4080	251	0.51
7	0	0.568	13020	22320	1480	1.00	7	0.1	0.284	5880	10080	650	0.74	7	0.2	0.001	2800	4080	320	0.51
7	0	0.852	560	960	60	0.76	7	0.1	0.284	8120	13920	900	0.76	7	0.2	0.001	3360	5760	380	0.53
7	0	0.852	980	1680	112	0.99	7	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.77	7	0.2	0.001	3920	6720	440	0.53
7	0	0.852	1400	2400	160	1.00	7	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.78	7	0.2	0.001	4900	8400	550	0.54
7	0	0.852	1960	3360	215	1.00	7	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.78	7	0.2	0.001	5880	10080	650	0.55
7	0	0.852	2380	4080	251	1.00	7	0.1	0.568	560	960	60	0.49	7	0.2	0.001	8120	13920	900	0.56
7	0	0.852	2800	4080	320	1.00	7	0.1	0.568	980	1680	112	0.60	7	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.56
7	0	0.852	3360	5760	380	1.00	7	0.1	0.568	1400	2400	160	0.64	7	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.57
7	0	0.852	3920	6720	440	1.00	7	0.1	0.568	1960	3360	215	0.68	7	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.57
7	0	0.852	4900	8400	550	1.00	7	0.1	0.568	2380	4080	251	0.70	7	0.2	0.284	560	960	60	0.24
7	0	0.852	5880	10080	650	1.00	7	0.1	0.568	2800	4080	320	0.71	7	0.2	0.284	980	1680	112	0.38
7	0	0.852	8120	13920	900	0.99	7	0.1	0.568	3360	5760	380	0.72	7	0.2	0.284	1400	2400	160	0.45
7	0	0.852	10500	18000	1200	1.00	7	0.1	0.568	3920	6720	440	0.73	7	0.2	0.284	1960	3360	215	0.50
7	0	0.852	11620	19920	1320	1.00	7	0.1	0.568	4900	8400	550	0.74	7	0.2	0.284	2380	4080	251	0.52
7	0	0.852	13020	22320	1480	1.00	7	0.1	0.568	5880	10080	650	0.75	7	0.2	0.284	2800	4080	320	0.52
7	0	1.13	560	960	60	0.76	7	0.1	0.568	8120	13920	900	0.76	7	0.2	0.284	3360	5760	380	0.52
7	0	1.13	980	1680	112	0.99	7	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.77	7	0.2	0.284	3920	6720	440	0.53
7	0	1.13	1400	2400	160	1.00	7	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.77	7	0.2	0.284	4900	8400	550	0.54
7	0	1.13	1960	3360	215	1.00	7	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.78	7	0.2	0.284	5880	10080	650	0.55
7	0	1.13	2380	4080	251	1.00	7	0.1	0.852	560	960	60	0.48	7	0.2	0.284	8120	13920	900	0.56
7	0	1.13	2800	4080	320	1.00	7	0.1	0.852	980	1680	112	0.60	7	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.57
7	0	1.13	3360	5760	380	1.00	7	0.1	0.852	1400	2400	160	0.64	7	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.57
7	0	1.13	3920	6720	440	1.00	7	0.1	0.852	1960	3360	215	0.68	7	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.58
7	0	1.13	4900	8400	550	1.00	7	0.1	0.852	2380	4080	251	0.70	7	0.2	0.568	560	960	60	0.23
7	0	1.13	5880	10080	650	1.00	7	0.1	0.852	2800	4080	320	0.71	7	0.2	0.568	980	1680	112	0.38
7	0	1.13	8120	13920	900	0.99	7	0.1	0.852	3360	5760	380	0.72	7	0.2	0.568	1400	2400	160	0.46
7	0	1.13	10500	18000	1200	1.00	7	0.1	0.852	3920	6720	440	0.73	7	0.2	0.568	1960	3360	215	0.50
7	0	1.13	11620	19920	1320	1.00	7	0.1	0.852	4900	8400	550	0.74	7	0.2	0.568	2380	4080	251	0.51
7	0	1.13	13020	22320	1480	1.00	7	0.1	0.852	5880	10080	650	0.74	7	0.2	0.568	2800	4080	320	0.51
7	0	1.42	560	960	60	0.76	7	0.1	0.852	8120	13920	900	0.76	7	0.2	0.568	3360	5760	380	0.53
7	0	1.42	980	1680	112	0.99	7	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.77	7	0.2	0.568	3920	6720	440	0.54
7	0	1.42	1400	2400	160	1.00	7	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.77	7	0.2	0.568	4900	8400	550	0.54
7	0	1.42	1960	3360	215	1.00	7	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.78	7	0.2	0.568	5880	10080	650	0.55
7	0	1.42	2380	4080	251	1.00	7	0.1	1.13	560	960	60	0.49	7	0.2	0.568	8120	13920	900	0.56
7	0	1.42	2800	4080	320	1.00	7	0.1	1.13	980	1680	112	0.60	7	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.57
7	0	1.42	3360	5760	380	1.00	7	0.1	1.13	1400	2400	160	0.65	7	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.58
7	0	1.42	3920	6720	440	1.00	7	0.1	1.13	1960	3360	215	0.68	7	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.58
7	0	1.42	4900	8400	550	1.00	7	0.1	1.13	2380	4080	251	0.71	7	0.2	0.852	560	960	60	0.33
7	0	1.42	5880	10080	650	1.00	7	0.1	1.13	2800	4080	320	0.71	7	0.2	0.852	980	1680	112	0.37
7	0	1.42	8120	13920	900	0.99	7	0.1	1.13	3360	5760	380	0.72	7	0.2	0.852	1400	2400	160	0.44
7	0	1.42	10500	18000	1200	1.00	7	0.1	1.13	3920	6720	440	0.73	7	0.2	0.852	1960	3360	215	0.49
7	0	1.42	11620	19920	1320	1.00	7	0.1	1.13	4900	8400	550	0.74	7	0.2	0.852	2380	4080	251	0.52
7	0	1.42	13020	22320	1480	1.00	7	0.1	1.13	5880	10080	650	0.75	7	0.2	0.852	2800	4080	320	0.53
7	0.1	0.001	560	960	60	0.47	7	0.1	1.13	8120	13920	900	0.76	7	0.2	0.852	3360	5760	380	0.53
7	0.1	0.001	980	1680	112	0.60	7	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.77	7	0.2	0.852	3920	6720	440	0.54
7	0.1	0.001	1400	2400	160	0.64	7	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.78	7	0.2	0.852	4900	8400	550	0.55
7	0.1	0.001	1960	3360	215	0.68	7	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.78	7	0.2	0.852	5880	10080	650	0.56
7	0.1	0.001	2380	4080	251	0.69	7	0.1	1.42	560	960	60	0.51	7	0.2	0.852	8120	13920	900	0.57
7	0.1	0.001	2800	4080	320	0.71	7	0.1	1.42	980	1680	112	0.60	7	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.57
7	0.1	0.001	3360	5760	380	0.72	7	0.1	1.42	1400	2400	160	0.65	7	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.58
7	0.1	0.001	3920	6720	440	0.73	7	0.1	1.42	1960	3360	215	0.68	7	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.58
7	0.1	0.001	4900	8400	550	0.74	7	0.1	1.42	2380	4080	251	0.70	7	0.2	1.13	560	960	60	0.24
7	0.1	0.001	5880	10080	650	0.75	7	0.1	1.42	2800	4080	320	0.71	7	0.2	1.13	980	1680	112	0.41
7	0.1	0.001	8120	13920	900	0.76	7	0.1	1.42	3360	5760	380	0.72	7	0.2	1.13	1400	2400	160	0.46
7	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.77	7	0.1	1.42	3920	6720	440	0.73	7	0.2	1.13	1960	3360	215	0.50
7	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.77	7	0.1	1.42	4900	8400	550	0.74	7	0.2	1.13	2380	4080	251	0.52
7	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.78	7	0.1	1.42	5880	10080	650	0.75	7	0.2	1.13	2800	4080	320	0.53
7	0.1	0.284	560	960	60	0.50	7	0.1	1.42	8120	13920	900	0.76	7	0.2	1.13	3360	5760	380	0.54
7	0.1	0.284	980	1680	112	0.60	7	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.77	7	0.2	1.13	3920	6720	440	0.54
7	0.1	0.284	1400	2400	160	0.64	7	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.78	7	0.2	1.13	4900	8400	550	0.55
7	0.1	0.284	1960	3360	215	0.68	7	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.78	7	0.2	1.13	5880	10080	650	0.56
7	0.1	0.284	2380	4080	251	0.69	7	0.2	0.001	560	960	60	0.24	7	0.2	1.13	8120	13920	900	0.58
7	0.1	0.284	2800	4080	320	0.70	7	0.2	0.001	980	1680	112	0.36	7	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.57

7	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.58	7	0.3	0.852	4900	8400	550	0.36	9	0	0.568	2380	4080	251	0.99
7	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.58	7	0.3	0.852	5880	10080	650	0.37	9	0	0.568	2800	4080	320	0.99
7	0.2	1.42	560	960	60	0.26	7	0.3	0.852	8120	13920	900	0.39	9	0	0.568	3360	5760	380	0.98
7	0.2	1.42	980	1680	112	0.40	7	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.39	9	0	0.568	3920	6720	440	0.98
7	0.2	1.42	1400	2400	160	0.45	7	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.40	9	0	0.568	4900	8400	550	0.98
7	0.2	1.42	1960	3360	215	0.51	7	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.41	9	0	0.568	5880	10080	650	0.97
7	0.2	1.42	2380	4080	251	0.52	7	0.3	1.13	560	960	60	0.13	9	0	0.568	8120	13920	900	0.98
7	0.2	1.42	2800	4080	320	0.54	7	0.3	1.13	980	1680	112	0.18	9	0	0.568	10500	18000	1200	1.00
7	0.2	1.42	3360	5760	380	0.55	7	0.3	1.13	1400	2400	160	0.28	9	0	0.568	11620	19920	1320	0.99
7	0.2	1.42	3920	6720	440	0.55	7	0.3	1.13	1960	3360	215	0.33	9	0	0.568	13020	22320	1480	1.00
7	0.2	1.42	4900	8400	550	0.56	7	0.3	1.13	2380	4080	251	0.35	9	0	0.852	560	960	60	0.55
7	0.2	1.42	5880	10080	650	0.57	7	0.3	1.13	2800	4080	320	0.36	9	0	0.852	980	1680	112	0.92
7	0.2	1.42	8120	13920	900	0.57	7	0.3	1.13	3360	5760	380	0.37	9	0	0.852	1400	2400	160	0.99
7	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.57	7	0.3	1.13	3920	6720	440	0.38	9	0	0.852	1960	3360	215	1.00
7	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.58	7	0.3	1.13	4900	8400	550	0.39	9	0	0.852	2380	4080	251	0.99
7	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.58	7	0.3	1.13	5880	10080	650	0.40	9	0	0.852	2800	4080	320	0.99
7	0.3	0.001	560	960	60	0.08	7	0.3	1.13	8120	13920	900	0.41	9	0	0.852	3360	5760	380	0.98
7	0.3	0.001	980	1680	112	0.14	7	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.42	9	0	0.852	3920	6720	440	0.98
7	0.3	0.001	1400	2400	160	0.21	7	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.40	9	0	0.852	4900	8400	550	0.98
7	0.3	0.001	1960	3360	215	0.25	7	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.41	9	0	0.852	5880	10080	650	0.97
7	0.3	0.001	2380	4080	251	0.27	7	0.3	1.42	560	960	60	0.15	9	0	0.852	8120	13920	900	0.98
7	0.3	0.001	2800	4080	320	0.29	7	0.3	1.42	980	1680	112	0.17	9	0	0.852	10500	18000	1200	1.00
7	0.3	0.001	3360	5760	380	0.31	7	0.3	1.42	1400	2400	160	0.30	9	0	0.852	11620	19920	1320	0.99
7	0.3	0.001	3920	6720	440	0.33	7	0.3	1.42	1960	3360	215	0.33	9	0	0.852	13020	22320	1480	1.00
7	0.3	0.001	4900	8400	550	0.34	7	0.3	1.42	2380	4080	251	0.36	9	0	1.13	560	960	60	0.55
7	0.3	0.001	5880	10080	650	0.34	7	0.3	1.42	2800	4080	320	0.37	9	0	1.13	980	1680	112	0.92
7	0.3	0.001	8120	13920	900	0.36	7	0.3	1.42	3360	5760	380	0.38	9	0	1.13	1400	2400	160	0.99
7	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.36	7	0.3	1.42	3920	6720	440	0.39	9	0	1.13	1960	3360	215	1.00
7	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.37	7	0.3	1.42	4900	8400	550	0.40	9	0	1.13	2380	4080	251	0.99
7	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.38	7	0.3	1.42	5880	10080	650	0.41	9	0	1.13	2800	4080	320	0.99
7	0.3	0.284	560	960	60	0.11	7	0.3	1.42	8120	13920	900	0.42	9	0	1.13	3360	5760	380	0.98
7	0.3	0.284	980	1680	112	0.19	7	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.43	9	0	1.13	3920	6720	440	0.98
7	0.3	0.284	1400	2400	160	0.24	7	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.40	9	0	1.13	4900	8400	550	0.98
7	0.3	0.284	1960	3360	215	0.26	7	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.41	9	0	1.13	5880	10080	650	0.97
7	0.3	0.284	2380	4080	251	0.30	9	0	0.001	560	960	60	0.55	9	0	1.13	8120	13920	900	0.98
7	0.3	0.284	2800	4080	320	0.31	9	0	0.001	980	1680	112	0.92	9	0	1.13	10500	18000	1200	1.00
7	0.3	0.284	3360	5760	380	0.32	9	0	0.001	1400	2400	160	0.99	9	0	1.13	11620	19920	1320	0.99
7	0.3	0.284	3920	6720	440	0.34	9	0	0.001	1960	3360	215	1.00	9	0	1.13	13020	22320	1480	1.00
7	0.3	0.284	4900	8400	550	0.36	9	0	0.001	2380	4080	251	0.99	9	0	1.42	560	960	60	0.55
7	0.3	0.284	5880	10080	650	0.37	9	0	0.001	2800	4080	320	0.99	9	0	1.42	980	1680	112	0.92
7	0.3	0.284	8120	13920	900	0.37	9	0	0.001	3360	5760	380	0.98	9	0	1.42	1400	2400	160	0.99
7	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.38	9	0	0.001	3920	6720	440	0.98	9	0	1.42	1960	3360	215	1.00
7	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.38	9	0	0.001	4900	8400	550	0.98	9	0	1.42	2380	4080	251	0.99
7	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.40	9	0	0.001	5880	10080	650	0.97	9	0	1.42	2800	4080	320	0.99
7	0.3	0.568	560	960	60	0.12	9	0	0.001	8120	13920	900	0.98	9	0	1.42	3360	5760	380	0.98
7	0.3	0.568	980	1680	112	0.17	9	0	0.001	10500	18000	1200	1.00	9	0	1.42	3920	6720	440	0.98
7	0.3	0.568	1400	2400	160	0.26	9	0	0.001	11620	19920	1320	0.99	9	0	1.42	4900	8400	550	0.98
7	0.3	0.568	1960	3360	215	0.27	9	0	0.001	13020	22320	1480	1.00	9	0	1.42	5880	10080	650	0.97
7	0.3	0.568	2380	4080	251	0.29	9	0	0.284	560	960	60	0.55	9	0	1.42	8120	13920	900	0.98
7	0.3	0.568	2800	4080	320	0.33	9	0	0.284	980	1680	112	0.92	9	0	1.42	10500	18000	1200	1.00
7	0.3	0.568	3360	5760	380	0.35	9	0	0.284	1400	2400	160	0.99	9	0	1.42	11620	19920	1320	0.99
7	0.3	0.568	3920	6720	440	0.36	9	0	0.284	1960	3360	215	1.00	9	0	1.42	13020	22320	1480	1.00
7	0.3	0.568	4900	8400	550	0.36	9	0	0.284	2380	4080	251	0.99	9	0.1	0.001	560	960	60	0.32
7	0.3	0.568	5880	10080	650	0.36	9	0	0.284	2800	4080	320	0.99	9	0.1	0.001	980	1680	112	0.50
7	0.3	0.568	8120	13920	900	0.39	9	0	0.284	3360	5760	380	0.98	9	0.1	0.001	1400	2400	160	0.58
7	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.39	9	0	0.284	3920	6720	440	0.98	9	0.1	0.001	1960	3360	215	0.62
7	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.39	9	0	0.284	4900	8400	550	0.98	9	0.1	0.001	2380	4080	251	0.65
7	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.40	9	0	0.284	5880	10080	650	0.97	9	0.1	0.001	2800	4080	320	0.66
7	0.3	0.852	560	960	60	0.11	9	0	0.284	8120	13920	900	0.98	9	0.1	0.001	3360	5760	380	0.68
7	0.3	0.852	980	1680	112	0.20	9	0	0.284	10500	18000	1200	1.00	9	0.1	0.001	3920	6720	440	0.69
7	0.3	0.852	1400	2400	160	0.27	9	0	0.284	11620	19920	1320	0.99	9	0.1	0.001	4900	8400	550	0.71
7	0.3	0.852	1960	3360	215	0.30	9	0	0.284	13020	22320	1480	1.00	9	0.1	0.001	5880	10080	650	0.72
7	0.3	0.852	2380	4080	251	0.30	9	0	0.568	560	960	60	0.55	9	0.1	0.001	8120	13920	900	0.74
7	0.3	0.852	2800	4080	320	0.34	9	0	0.568	980	1680	112	0.92	9	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.75
7	0.3	0.852	3360	5760	380	0.36	9	0	0.568	1400	2400	160	0.99	9	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.76
7	0.3	0.852	3920	6720	440	0.37	9	0	0.568	1960	3360	215	1.00	9	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.76

9	0.1	0.284	560	960	60	0.32	9	0.1	1.42	8120	13920	900	0.74	9	0.2	1.13	3360	5760	380	0.49
9	0.1	0.284	980	1680	112	0.50	9	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.75	9	0.2	1.13	3920	6720	440	0.51
9	0.1	0.284	1400	2400	160	0.59	9	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.76	9	0.2	1.13	4900	8400	550	0.52
9	0.1	0.284	1960	3360	215	0.63	9	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.76	9	0.2	1.13	5880	10080	650	0.54
9	0.1	0.284	2380	4080	251	0.64	9	0.2	0.001	560	960	60	0.14	9	0.2	1.13	8120	13920	900	0.55
9	0.1	0.284	2800	4080	320	0.66	9	0.2	0.001	980	1680	112	0.23	9	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.56
9	0.1	0.284	3360	5760	380	0.68	9	0.2	0.001	1400	2400	160	0.33	9	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.57
9	0.1	0.284	3920	6720	440	0.69	9	0.2	0.001	1960	3360	215	0.40	9	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.56
9	0.1	0.284	4900	8400	550	0.71	9	0.2	0.001	2380	4080	251	0.45	9	0.2	1.42	560	960	60	0.17
9	0.1	0.284	5880	10080	650	0.72	9	0.2	0.001	2800	4080	320	0.45	9	0.2	1.42	980	1680	112	0.28
9	0.1	0.284	8120	13920	900	0.74	9	0.2	0.001	3360	5760	380	0.49	9	0.2	1.42	1400	2400	160	0.40
9	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.75	9	0.2	0.001	3920	6720	440	0.48	9	0.2	1.42	1960	3360	215	0.44
9	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.76	9	0.2	0.001	4900	8400	550	0.50	9	0.2	1.42	2380	4080	251	0.47
9	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.76	9	0.2	0.001	5880	10080	650	0.52	9	0.2	1.42	2800	4080	320	0.48
9	0.1	0.568	560	960	60	0.32	9	0.2	0.001	8120	13920	900	0.54	9	0.2	1.42	3360	5760	380	0.50
9	0.1	0.568	980	1680	112	0.50	9	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.55	9	0.2	1.42	3920	6720	440	0.51
9	0.1	0.568	1400	2400	160	0.59	9	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.55	9	0.2	1.42	4900	8400	550	0.53
9	0.1	0.568	1960	3360	215	0.62	9	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.55	9	0.2	1.42	5880	10080	650	0.54
9	0.1	0.568	2380	4080	251	0.64	9	0.2	0.284	560	960	60	0.16	9	0.2	1.42	8120	13920	900	0.55
9	0.1	0.568	2800	4080	320	0.66	9	0.2	0.284	980	1680	112	0.26	9	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.56
9	0.1	0.568	3360	5760	380	0.68	9	0.2	0.284	1400	2400	160	0.35	9	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.57
9	0.1	0.568	3920	6720	440	0.69	9	0.2	0.284	1960	3360	215	0.42	9	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.57
9	0.1	0.568	4900	8400	550	0.71	9	0.2	0.284	2380	4080	251	0.44	9	0.3	0.001	560	960	60	0.05
9	0.1	0.568	5880	10080	650	0.72	9	0.2	0.284	2800	4080	320	0.47	9	0.3	0.001	980	1680	112	0.08
9	0.1	0.568	8120	13920	900	0.74	9	0.2	0.284	3360	5760	380	0.48	9	0.3	0.001	1400	2400	160	0.12
9	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.75	9	0.2	0.284	3920	6720	440	0.49	9	0.3	0.001	1960	3360	215	0.17
9	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.76	9	0.2	0.284	4900	8400	550	0.51	9	0.3	0.001	2380	4080	251	0.19
9	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.76	9	0.2	0.284	5880	10080	650	0.52	9	0.3	0.001	2800	4080	320	0.23
9	0.1	0.852	560	960	60	0.31	9	0.2	0.284	8120	13920	900	0.55	9	0.3	0.001	3360	5760	380	0.25
9	0.1	0.852	980	1680	112	0.49	9	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.55	9	0.3	0.001	3920	6720	440	0.27
9	0.1	0.852	1400	2400	160	0.60	9	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.56	9	0.3	0.001	4900	8400	550	0.30
9	0.1	0.852	1960	3360	215	0.62	9	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.56	9	0.3	0.001	5880	10080	650	0.30
9	0.1	0.852	2380	4080	251	0.64	9	0.2	0.568	560	960	60	0.16	9	0.3	0.001	8120	13920	900	0.33
9	0.1	0.852	2800	4080	320	0.66	9	0.2	0.568	980	1680	112	0.27	9	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.35
9	0.1	0.852	3360	5760	380	0.68	9	0.2	0.568	1400	2400	160	0.35	9	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.36
9	0.1	0.852	3920	6720	440	0.69	9	0.2	0.568	1960	3360	215	0.42	9	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.36
9	0.1	0.852	4900	8400	550	0.71	9	0.2	0.568	2380	4080	251	0.45	9	0.3	0.284	560	960	60	0.07
9	0.1	0.852	5880	10080	650	0.72	9	0.2	0.568	2800	4080	320	0.46	9	0.3	0.284	980	1680	112	0.12
9	0.1	0.852	8120	13920	900	0.74	9	0.2	0.568	3360	5760	380	0.48	9	0.3	0.284	1400	2400	160	0.16
9	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.75	9	0.2	0.568	3920	6720	440	0.50	9	0.3	0.284	1960	3360	215	0.19
9	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.76	9	0.2	0.568	4900	8400	550	0.51	9	0.3	0.284	2380	4080	251	0.24
9	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.76	9	0.2	0.568	5880	10080	650	0.53	9	0.3	0.284	2800	4080	320	0.25
9	0.1	1.13	560	960	60	0.32	9	0.2	0.568	8120	13920	900	0.55	9	0.3	0.284	3360	5760	380	0.27
9	0.1	1.13	980	1680	112	0.52	9	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.56	9	0.3	0.284	3920	6720	440	0.30
9	0.1	1.13	1400	2400	160	0.59	9	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.56	9	0.3	0.284	4900	8400	550	0.33
9	0.1	1.13	1960	3360	215	0.62	9	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.56	9	0.3	0.284	5880	10080	650	0.32
9	0.1	1.13	2380	4080	251	0.64	9	0.2	0.852	560	960	60	0.17	9	0.3	0.284	8120	13920	900	0.34
9	0.1	1.13	2800	4080	320	0.66	9	0.2	0.852	980	1680	112	0.26	9	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.36
9	0.1	1.13	3360	5760	380	0.68	9	0.2	0.852	1400	2400	160	0.36	9	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.36
9	0.1	1.13	3920	6720	440	0.70	9	0.2	0.852	1960	3360	215	0.41	9	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.37
9	0.1	1.13	4900	8400	550	0.71	9	0.2	0.852	2380	4080	251	0.44	9	0.3	0.568	560	960	60	0.08
9	0.1	1.13	5880	10080	650	0.72	9	0.2	0.852	2800	4080	320	0.47	9	0.3	0.568	980	1680	112	0.12
9	0.1	1.13	8120	13920	900	0.74	9	0.2	0.852	3360	5760	380	0.49	9	0.3	0.568	1400	2400	160	0.17
9	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.75	9	0.2	0.852	3920	6720	440	0.50	9	0.3	0.568	1960	3360	215	0.22
9	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.76	9	0.2	0.852	4900	8400	550	0.52	9	0.3	0.568	2380	4080	251	0.23
9	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.76	9	0.2	0.852	5880	10080	650	0.53	9	0.3	0.568	2800	4080	320	0.27
9	0.1	1.42	560	960	60	0.33	9	0.2	0.852	8120	13920	900	0.55	9	0.3	0.568	3360	5760	380	0.30
9	0.1	1.42	980	1680	112	0.49	9	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.57	9	0.3	0.568	3920	6720	440	0.31
9	0.1	1.42	1400	2400	160	0.59	9	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.57	9	0.3	0.568	4900	8400	550	0.32
9	0.1	1.42	1960	3360	215	0.62	9	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.56	9	0.3	0.568	5880	10080	650	0.33
9	0.1	1.42	2380	4080	251	0.65	9	0.2	1.13	560	960	60	0.16	9	0.3	0.568	8120	13920	900	0.36
9	0.1	1.42	2800	4080	320	0.66	9	0.2	1.13	980	1680	112	0.33	9	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.37
9	0.1	1.42	3360	5760	380	0.68	9	0.2	1.13	1400	2400	160	0.39	9	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.37
9	0.1	1.42	3920	6720	440	0.69	9	0.2	1.13	1960	3360	215	0.43	9	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.38
9	0.1	1.42	4900	8400	550	0.71	9	0.2	1.13	2380	4080	251	0.46	9	0.3	0.852	560	960	60	0.09
9	0.1	1.42	5880	10080	650	0.72	9	0.2	1.13	2800	4080	320	0.48	9	0.3	0.852	980	1680	112	0.12

9	0.3	0.852	1400	2400	160	0.20	11	0	0.284	11620	19920	1320	0.99	11	0.1	0.001	4900	8400	550	0.68
9	0.3	0.852	1960	3360	215	0.25	11	0	0.284	13020	22320	1480	1.00	11	0.1	0.001	5880	10080	650	0.70
9	0.3	0.852	2380	4080	251	0.24	11	0	0.568	560	960	60	0.39	11	0.1	0.001	8120	13920	900	0.72
9	0.3	0.852	2800	4080	320	0.28	11	0	0.568	980	1680	112	0.66	11	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.73
9	0.3	0.852	3360	5760	380	0.30	11	0	0.568	1400	2400	160	0.89	11	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.73
9	0.3	0.852	3920	6720	440	0.33	11	0	0.568	1960	3360	215	0.97	11	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.74
9	0.3	0.852	4900	8400	550	0.33	11	0	0.568	2380	4080	251	0.98	11	0.1	0.284	560	960	60	0.21
9	0.3	0.852	5880	10080	650	0.34	11	0	0.568	2800	4080	320	1.00	11	0.1	0.284	980	1680	112	0.39
9	0.3	0.852	8120	13920	900	0.37	11	0	0.568	3360	5760	380	0.96	11	0.1	0.284	1400	2400	160	0.48
9	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.38	11	0	0.568	3920	6720	440	0.96	11	0.1	0.284	1960	3360	215	0.55
9	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.38	11	0	0.568	4900	8400	550	0.96	11	0.1	0.284	2380	4080	251	0.59
9	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.39	11	0	0.568	5880	10080	650	0.97	11	0.1	0.284	2800	4080	320	0.61
9	0.3	1.13	560	960	60	0.10	11	0	0.568	8120	13920	900	0.97	11	0.1	0.284	3360	5760	380	0.63
9	0.3	1.13	980	1680	112	0.14	11	0	0.568	10500	18000	1200	0.99	11	0.1	0.284	3920	6720	440	0.65
9	0.3	1.13	1400	2400	160	0.24	11	0	0.568	11620	19920	1320	0.99	11	0.1	0.284	4900	8400	550	0.68
9	0.3	1.13	1960	3360	215	0.27	11	0	0.568	13020	22320	1480	1.00	11	0.1	0.284	5880	10080	650	0.69
9	0.3	1.13	2380	4080	251	0.29	11	0	0.852	560	960	60	0.41	11	0.1	0.284	8120	13920	900	0.72
9	0.3	1.13	2800	4080	320	0.31	11	0	0.852	980	1680	112	0.66	11	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.73
9	0.3	1.13	3360	5760	380	0.33	11	0	0.852	1400	2400	160	0.89	11	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.73
9	0.3	1.13	3920	6720	440	0.34	11	0	0.852	1960	3360	215	0.97	11	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.74
9	0.3	1.13	4900	8400	550	0.37	11	0	0.852	2380	4080	251	0.98	11	0.1	0.568	560	960	60	0.22
9	0.3	1.13	5880	10080	650	0.37	11	0	0.852	2800	4080	320	1.00	11	0.1	0.568	980	1680	112	0.39
9	0.3	1.13	8120	13920	900	0.39	11	0	0.852	3360	5760	380	0.96	11	0.1	0.568	1400	2400	160	0.49
9	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.41	11	0	0.852	3920	6720	440	0.96	11	0.1	0.568	1960	3360	215	0.55
9	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.38	11	0	0.852	4900	8400	550	0.96	11	0.1	0.568	2380	4080	251	0.59
9	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.39	11	0	0.852	5880	10080	650	0.97	11	0.1	0.568	2800	4080	320	0.61
9	0.3	1.42	560	960	60	0.11	11	0	0.852	8120	13920	900	0.97	11	0.1	0.568	3360	5760	380	0.63
9	0.3	1.42	980	1680	112	0.13	11	0	0.852	10500	18000	1200	0.99	11	0.1	0.568	3920	6720	440	0.65
9	0.3	1.42	1400	2400	160	0.25	11	0	0.852	11620	19920	1320	0.99	11	0.1	0.568	4900	8400	550	0.68
9	0.3	1.42	1960	3360	215	0.28	11	0	0.852	13020	22320	1480	1.00	11	0.1	0.568	5880	10080	650	0.69
9	0.3	1.42	2380	4080	251	0.30	11	0	1.13	560	960	60	0.41	11	0.1	0.568	8120	13920	900	0.72
9	0.3	1.42	2800	4080	320	0.32	11	0	1.13	980	1680	112	0.66	11	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.73
9	0.3	1.42	3360	5760	380	0.35	11	0	1.13	1400	2400	160	0.89	11	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.73
9	0.3	1.42	3920	6720	440	0.35	11	0	1.13	1960	3360	215	0.97	11	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.74
9	0.3	1.42	4900	8400	550	0.37	11	0	1.13	2380	4080	251	0.98	11	0.1	0.852	560	960	60	0.23
9	0.3	1.42	5880	10080	650	0.38	11	0	1.13	2800	4080	320	1.00	11	0.1	0.852	980	1680	112	0.37
9	0.3	1.42	8120	13920	900	0.40	11	0	1.13	3360	5760	380	0.96	11	0.1	0.852	1400	2400	160	0.48
9	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.41	11	0	1.13	3920	6720	440	0.96	11	0.1	0.852	1960	3360	215	0.56
9	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.39	11	0	1.13	4900	8400	550	0.96	11	0.1	0.852	2380	4080	251	0.59
9	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.40	11	0	1.13	5880	10080	650	0.97	11	0.1	0.852	2800	4080	320	0.62
11	0	0.001	560	960	60	0.39	11	0	1.13	8120	13920	900	0.97	11	0.1	0.852	3360	5760	380	0.64
11	0	0.001	980	1680	112	0.66	11	0	1.13	10500	18000	1200	0.99	11	0.1	0.852	3920	6720	440	0.65
11	0	0.001	1400	2400	160	0.89	11	0	1.13	11620	19920	1320	0.99	11	0.1	0.852	4900	8400	550	0.68
11	0	0.001	1960	3360	215	0.97	11	0	1.13	13020	22320	1480	1.00	11	0.1	0.852	5880	10080	650	0.69
11	0	0.001	2380	4080	251	0.98	11	0	1.42	560	960	60	0.46	11	0.1	0.852	8120	13920	900	0.72
11	0	0.001	2800	4080	320	1.00	11	0	1.42	980	1680	112	0.66	11	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.73
11	0	0.001	3360	5760	380	0.96	11	0	1.42	1400	2400	160	0.89	11	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.73
11	0	0.001	3920	6720	440	0.96	11	0	1.42	1960	3360	215	0.97	11	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.74
11	0	0.001	4900	8400	550	0.96	11	0	1.42	2380	4080	251	0.98	11	0.1	1.13	560	960	60	0.23
11	0	0.001	5880	10080	650	0.97	11	0	1.42	2800	4080	320	1.00	11	0.1	1.13	980	1680	112	0.38
11	0	0.001	8120	13920	900	0.97	11	0	1.42	3360	5760	380	0.96	11	0.1	1.13	1400	2400	160	0.49
11	0	0.001	10500	18000	1200	0.99	11	0	1.42	3920	6720	440	0.96	11	0.1	1.13	1960	3360	215	0.57
11	0	0.001	11620	19920	1320	0.99	11	0	1.42	4900	8400	550	0.97	11	0.1	1.13	2380	4080	251	0.60
11	0	0.001	13020	22320	1480	1.00	11	0	1.42	5880	10080	650	0.96	11	0.1	1.13	2800	4080	320	0.62
11	0	0.284	560	960	60	0.39	11	0	1.42	8120	13920	900	0.98	11	0.1	1.13	3360	5760	380	0.64
11	0	0.284	980	1680	112	0.66	11	0	1.42	10500	18000	1200	0.99	11	0.1	1.13	3920	6720	440	0.65
11	0	0.284	1400	2400	160	0.89	11	0	1.42	11620	19920	1320	0.99	11	0.1	1.13	4900	8400	550	0.68
11	0	0.284	1960	3360	215	0.97	11	0	1.42	13020	22320	1480	1.00	11	0.1	1.13	5880	10080	650	0.70
11	0	0.284	2380	4080	251	0.98	11	0.1	0.001	560	960	60	0.23	11	0.1	1.13	8120	13920	900	0.72
11	0	0.284	2800	4080	320	1.00	11	0.1	0.001	980	1680	112	0.35	11	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.73
11	0	0.284	3360	5760	380	0.96	11	0.1	0.001	1400	2400	160	0.48	11	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.73
11	0	0.284	3920	6720	440	0.96	11	0.1	0.001	1960	3360	215	0.56	11	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.74
11	0	0.284	4900	8400	550	0.96	11	0.1	0.001	2380	4080	251	0.59	11	0.1	1.42	560	960	60	0.24
11	0	0.284	5880	10080	650	0.97	11	0.1	0.001	2800	4080	320	0.60	11	0.1	1.42	980	1680	112	0.40
11	0	0.284	8120	13920	900	0.97	11	0.1	0.001	3360	5760	380	0.63	11	0.1	1.42	1400	2400	160	0.49
11	0	0.284	10500	18000	1200	0.99	11	0.1	0.001	3920	6720	440	0.65	11	0.1	1.42	1960	3360	215	0.57

11	0.1	1.42	2380	4080	251	0.60	11	0.2	1.13	560	960	60	0.12	11	0.3	0.568	8120	13920	900	0.33
11	0.1	1.42	2800	4080	320	0.62	11	0.2	1.13	980	1680	112	0.23	11	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.35
11	0.1	1.42	3360	5760	380	0.64	11	0.2	1.13	1400	2400	160	0.30	11	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.36
11	0.1	1.42	3920	6720	440	0.65	11	0.2	1.13	1960	3360	215	0.39	11	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.36
11	0.1	1.42	4900	8400	550	0.68	11	0.2	1.13	2380	4080	251	0.39	11	0.3	0.852	560	960	60	0.08
11	0.1	1.42	5880	10080	650	0.69	11	0.2	1.13	2800	4080	320	0.43	11	0.3	0.852	980	1680	112	0.11
11	0.1	1.42	8120	13920	900	0.72	11	0.2	1.13	3360	5760	380	0.46	11	0.3	0.852	1400	2400	160	0.16
11	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.73	11	0.2	1.13	3920	6720	440	0.46	11	0.3	0.852	1960	3360	215	0.20
11	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.73	11	0.2	1.13	4900	8400	550	0.49	11	0.3	0.852	2380	4080	251	0.20
11	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.74	11	0.2	1.13	5880	10080	650	0.51	11	0.3	0.852	2800	4080	320	0.22
11	0.2	0.001	560	960	60	0.09	11	0.2	1.13	8120	13920	900	0.53	11	0.3	0.852	3360	5760	380	0.26
11	0.2	0.001	980	1680	112	0.15	11	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.55	11	0.3	0.852	3920	6720	440	0.28
11	0.2	0.001	1400	2400	160	0.24	11	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.56	11	0.3	0.852	4900	8400	550	0.30
11	0.2	0.001	1960	3360	215	0.32	11	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.55	11	0.3	0.852	5880	10080	650	0.32
11	0.2	0.001	2380	4080	251	0.37	11	0.2	1.42	560	960	60	0.14	11	0.3	0.852	8120	13920	900	0.34
11	0.2	0.001	2800	4080	320	0.39	11	0.2	1.42	980	1680	112	0.22	11	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.36
11	0.2	0.001	3360	5760	380	0.42	11	0.2	1.42	1400	2400	160	0.32	11	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.36
11	0.2	0.001	3920	6720	440	0.44	11	0.2	1.42	1960	3360	215	0.38	11	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.38
11	0.2	0.001	4900	8400	550	0.46	11	0.2	1.42	2380	4080	251	0.43	11	0.3	1.13	560	960	60	0.08
11	0.2	0.001	5880	10080	650	0.49	11	0.2	1.42	2800	4080	320	0.44	11	0.3	1.13	980	1680	112	0.11
11	0.2	0.001	8120	13920	900	0.51	11	0.2	1.42	3360	5760	380	0.46	11	0.3	1.13	1400	2400	160	0.18
11	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.53	11	0.2	1.42	3920	6720	440	0.47	11	0.3	1.13	1960	3360	215	0.22
11	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.55	11	0.2	1.42	4900	8400	550	0.49	11	0.3	1.13	2380	4080	251	0.26
11	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.54	11	0.2	1.42	5880	10080	650	0.51	11	0.3	1.13	2800	4080	320	0.27
11	0.2	0.284	560	960	60	0.13	11	0.2	1.42	8120	13920	900	0.54	11	0.3	1.13	3360	5760	380	0.30
11	0.2	0.284	980	1680	112	0.21	11	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.54	11	0.3	1.13	3920	6720	440	0.31
11	0.2	0.284	1400	2400	160	0.26	11	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.55	11	0.3	1.13	4900	8400	550	0.33
11	0.2	0.284	1960	3360	215	0.33	11	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.55	11	0.3	1.13	5880	10080	650	0.35
11	0.2	0.284	2380	4080	251	0.40	11	0.3	0.001	560	960	60	0.04	11	0.3	1.13	8120	13920	900	0.37
11	0.2	0.284	2800	4080	320	0.40	11	0.3	0.001	980	1680	112	0.06	11	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.38
11	0.2	0.284	3360	5760	380	0.42	11	0.3	0.001	1400	2400	160	0.09	11	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.37
11	0.2	0.284	3920	6720	440	0.45	11	0.3	0.001	1960	3360	215	0.12	11	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.37
11	0.2	0.284	4900	8400	550	0.48	11	0.3	0.001	2380	4080	251	0.13	11	0.3	1.42	560	960	60	0.09
11	0.2	0.284	5880	10080	650	0.49	11	0.3	0.001	2800	4080	320	0.15	11	0.3	1.42	980	1680	112	0.11
11	0.2	0.284	8120	13920	900	0.53	11	0.3	0.001	3360	5760	380	0.20	11	0.3	1.42	1400	2400	160	0.19
11	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.54	11	0.3	0.001	3920	6720	440	0.22	11	0.3	1.42	1960	3360	215	0.24
11	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.54	11	0.3	0.001	4900	8400	550	0.25	11	0.3	1.42	2380	4080	251	0.27
11	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.55	11	0.3	0.001	5880	10080	650	0.27	11	0.3	1.42	2800	4080	320	0.29
11	0.2	0.568	560	960	60	0.13	11	0.3	0.001	8120	13920	900	0.30	11	0.3	1.42	3360	5760	380	0.30
11	0.2	0.568	980	1680	112	0.18	11	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.32	11	0.3	1.42	3920	6720	440	0.32
11	0.2	0.568	1400	2400	160	0.27	11	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.34	11	0.3	1.42	4900	8400	550	0.35
11	0.2	0.568	1960	3360	215	0.35	11	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.33	11	0.3	1.42	5880	10080	650	0.36
11	0.2	0.568	2380	4080	251	0.40	11	0.3	0.284	560	960	60	0.05	11	0.3	1.42	8120	13920	900	0.38
11	0.2	0.568	2800	4080	320	0.41	11	0.3	0.284	980	1680	112	0.09	11	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.40
11	0.2	0.568	3360	5760	380	0.43	11	0.3	0.284	1400	2400	160	0.11	11	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.38
11	0.2	0.568	3920	6720	440	0.46	11	0.3	0.284	1960	3360	215	0.15	11	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.38
11	0.2	0.568	4900	8400	550	0.47	11	0.3	0.284	2380	4080	251	0.17	15	0	0.001	560	960	60	0.24
11	0.2	0.568	5880	10080	650	0.50	11	0.3	0.284	2800	4080	320	0.19	15	0	0.001	980	1680	112	0.38
11	0.2	0.568	8120	13920	900	0.52	11	0.3	0.284	3360	5760	380	0.22	15	0	0.001	1400	2400	160	0.55
11	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.54	11	0.3	0.284	3920	6720	440	0.25	15	0	0.001	1960	3360	215	0.75
11	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.55	11	0.3	0.284	4900	8400	550	0.27	15	0	0.001	2380	4080	251	0.88
11	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.55	11	0.3	0.284	5880	10080	650	0.30	15	0	0.001	2800	4080	320	0.96
11	0.2	0.852	560	960	60	0.12	11	0.3	0.284	8120	13920	900	0.32	15	0	0.001	3360	5760	380	0.96
11	0.2	0.852	980	1680	112	0.21	11	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.35	15	0	0.001	3920	6720	440	0.96
11	0.2	0.852	1400	2400	160	0.27	11	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.35	15	0	0.001	4900	8400	550	0.94
11	0.2	0.852	1960	3360	215	0.36	11	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.36	15	0	0.001	5880	10080	650	0.95
11	0.2	0.852	2380	4080	251	0.40	11	0.3	0.568	560	960	60	0.07	15	0	0.001	8120	13920	900	0.96
11	0.2	0.852	2800	4080	320	0.41	11	0.3	0.568	980	1680	112	0.10	15	0	0.001	10500	18000	1200	0.97
11	0.2	0.852	3360	5760	380	0.43	11	0.3	0.568	1400	2400	160	0.14	15	0	0.001	11620	19920	1320	0.97
11	0.2	0.852	3920	6720	440	0.45	11	0.3	0.568	1960	3360	215	0.17	15	0	0.001	13020	22320	1480	0.98
11	0.2	0.852	4900	8400	550	0.48	11	0.3	0.568	2380	4080	251	0.19	15	0	0.284	560	960	60	0.24
11	0.2	0.852	5880	10080	650	0.50	11	0.3	0.568	2800	4080	320	0.20	15	0	0.284	980	1680	112	0.39
11	0.2	0.852	8120	13920	900	0.53	11	0.3	0.568	3360	5760	380	0.23	15	0	0.284	1400	2400	160	0.55
11	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.54	11	0.3	0.568	3920	6720	440	0.27	15	0	0.284	1960	3360	215	0.75
11	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.55	11	0.3	0.568	4900	8400	550	0.29	15	0	0.284	2380	4080	251	0.88
11	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.56	11	0.3	0.568	5880	10080	650	0.31	15	0	0.284	2800	4080	320	0.96

15	0	0.284	3360	5760	380	0.96	15	0.1	0.001	1400	2400	160	0.29	15	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.70
15	0	0.284	3920	6720	440	0.96	15	0.1	0.001	1960	3360	215	0.40	15	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.71
15	0	0.284	4900	8400	550	0.94	15	0.1	0.001	2380	4080	251	0.45	15	0.1	1.42	560	960	60	0.14
15	0	0.284	5880	10080	650	0.95	15	0.1	0.001	2800	4080	320	0.51	15	0.1	1.42	980	1680	112	0.22
15	0	0.284	8120	13920	900	0.96	15	0.1	0.001	3360	5760	380	0.55	15	0.1	1.42	1400	2400	160	0.35
15	0	0.284	10500	18000	1200	0.97	15	0.1	0.001	3920	6720	440	0.57	15	0.1	1.42	1960	3360	215	0.44
15	0	0.284	11620	19920	1320	0.97	15	0.1	0.001	4900	8400	550	0.61	15	0.1	1.42	2380	4080	251	0.48
15	0	0.284	13020	22320	1480	0.98	15	0.1	0.001	5880	10080	650	0.63	15	0.1	1.42	2800	4080	320	0.52
15	0	0.568	560	960	60	0.24	15	0.1	0.001	8120	13920	900	0.67	15	0.1	1.42	3360	5760	380	0.55
15	0	0.568	980	1680	112	0.39	15	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.69	15	0.1	1.42	3920	6720	440	0.58
15	0	0.568	1400	2400	160	0.55	15	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.70	15	0.1	1.42	4900	8400	550	0.61
15	0	0.568	1960	3360	215	0.75	15	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.71	15	0.1	1.42	5880	10080	650	0.64
15	0	0.568	2380	4080	251	0.88	15	0.1	0.284	560	960	60	0.12	15	0.1	1.42	8120	13920	900	0.67
15	0	0.568	2800	4080	320	0.96	15	0.1	0.284	980	1680	112	0.21	15	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.70
15	0	0.568	3360	5760	380	0.96	15	0.1	0.284	1400	2400	160	0.30	15	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.70
15	0	0.568	3920	6720	440	0.96	15	0.1	0.284	1960	3360	215	0.41	15	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.71
15	0	0.568	4900	8400	550	0.94	15	0.1	0.284	2380	4080	251	0.46	15	0.2	0.001	560	960	60	0.06
15	0	0.568	5880	10080	650	0.95	15	0.1	0.284	2800	4080	320	0.51	15	0.2	0.001	980	1680	112	0.10
15	0	0.568	8120	13920	900	0.96	15	0.1	0.284	3360	5760	380	0.55	15	0.2	0.001	1400	2400	160	0.15
15	0	0.568	10500	18000	1200	0.97	15	0.1	0.284	3920	6720	440	0.57	15	0.2	0.001	1960	3360	215	0.20
15	0	0.568	11620	19920	1320	0.97	15	0.1	0.284	4900	8400	550	0.61	15	0.2	0.001	2380	4080	251	0.23
15	0	0.568	13020	22320	1480	0.98	15	0.1	0.284	5880	10080	650	0.63	15	0.2	0.001	2800	4080	320	0.25
15	0	0.852	560	960	60	0.24	15	0.1	0.284	8120	13920	900	0.67	15	0.2	0.001	3360	5760	380	0.30
15	0	0.852	980	1680	112	0.39	15	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.69	15	0.2	0.001	3920	6720	440	0.34
15	0	0.852	1400	2400	160	0.55	15	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.70	15	0.2	0.001	4900	8400	550	0.39
15	0	0.852	1960	3360	215	0.75	15	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.71	15	0.2	0.001	5880	10080	650	0.41
15	0	0.852	2380	4080	251	0.88	15	0.1	0.568	560	960	60	0.13	15	0.2	0.001	8120	13920	900	0.46
15	0	0.852	2800	4080	320	0.96	15	0.1	0.568	980	1680	112	0.22	15	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.49
15	0	0.852	3360	5760	380	0.96	15	0.1	0.568	1400	2400	160	0.30	15	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.50
15	0	0.852	3920	6720	440	0.96	15	0.1	0.568	1960	3360	215	0.41	15	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.50
15	0	0.852	4900	8400	550	0.94	15	0.1	0.568	2380	4080	251	0.48	15	0.2	0.284	560	960	60	0.07
15	0	0.852	5880	10080	650	0.95	15	0.1	0.568	2800	4080	320	0.51	15	0.2	0.284	980	1680	112	0.11
15	0	0.852	8120	13920	900	0.96	15	0.1	0.568	3360	5760	380	0.55	15	0.2	0.284	1400	2400	160	0.16
15	0	0.852	10500	18000	1200	0.97	15	0.1	0.568	3920	6720	440	0.57	15	0.2	0.284	1960	3360	215	0.21
15	0	0.852	11620	19920	1320	0.97	15	0.1	0.568	4900	8400	550	0.61	15	0.2	0.284	2380	4080	251	0.25
15	0	0.852	13020	22320	1480	0.98	15	0.1	0.568	5880	10080	650	0.63	15	0.2	0.284	2800	4080	320	0.30
15	0	1.13	560	960	60	0.24	15	0.1	0.568	8120	13920	900	0.67	15	0.2	0.284	3360	5760	380	0.32
15	0	1.13	980	1680	112	0.39	15	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.69	15	0.2	0.284	3920	6720	440	0.37
15	0	1.13	1400	2400	160	0.55	15	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.70	15	0.2	0.284	4900	8400	550	0.39
15	0	1.13	1960	3360	215	0.75	15	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.71	15	0.2	0.284	5880	10080	650	0.42
15	0	1.13	2380	4080	251	0.88	15	0.1	0.852	560	960	60	0.14	15	0.2	0.284	8120	13920	900	0.47
15	0	1.13	2800	4080	320	0.96	15	0.1	0.852	980	1680	112	0.24	15	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.50
15	0	1.13	3360	5760	380	0.96	15	0.1	0.852	1400	2400	160	0.31	15	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.50
15	0	1.13	3920	6720	440	0.96	15	0.1	0.852	1960	3360	215	0.43	15	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.51
15	0	1.13	4900	8400	550	0.94	15	0.1	0.852	2380	4080	251	0.49	15	0.2	0.568	560	960	60	0.08
15	0	1.13	5880	10080	650	0.95	15	0.1	0.852	2800	4080	320	0.52	15	0.2	0.568	980	1680	112	0.12
15	0	1.13	8120	13920	900	0.96	15	0.1	0.852	3360	5760	380	0.55	15	0.2	0.568	1400	2400	160	0.16
15	0	1.13	10500	18000	1200	0.97	15	0.1	0.852	3920	6720	440	0.58	15	0.2	0.568	1960	3360	215	0.22
15	0	1.13	11620	19920	1320	0.97	15	0.1	0.852	4900	8400	550	0.61	15	0.2	0.568	2380	4080	251	0.29
15	0	1.13	13020	22320	1480	0.98	15	0.1	0.852	5880	10080	650	0.64	15	0.2	0.568	2800	4080	320	0.30
15	0	1.42	560	960	60	0.24	15	0.1	0.852	8120	13920	900	0.67	15	0.2	0.568	3360	5760	380	0.33
15	0	1.42	980	1680	112	0.39	15	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.69	15	0.2	0.568	3920	6720	440	0.37
15	0	1.42	1400	2400	160	0.55	15	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.70	15	0.2	0.568	4900	8400	550	0.40
15	0	1.42	1960	3360	215	0.75	15	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.71	15	0.2	0.568	5880	10080	650	0.43
15	0	1.42	2380	4080	251	0.88	15	0.1	1.13	560	960	60	0.14	15	0.2	0.568	8120	13920	900	0.48
15	0	1.42	2800	4080	320	0.96	15	0.1	1.13	980	1680	112	0.23	15	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.50
15	0	1.42	3360	5760	380	0.96	15	0.1	1.13	1400	2400	160	0.33	15	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.51
15	0	1.42	3920	6720	440	0.96	15	0.1	1.13	1960	3360	215	0.43	15	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.52
15	0	1.42	4900	8400	550	0.94	15	0.1	1.13	2380	4080	251	0.49	15	0.2	0.852	560	960	60	0.08
15	0	1.42	5880	10080	650	0.95	15	0.1	1.13	2800	4080	320	0.52	15	0.2	0.852	980	1680	112	0.13
15	0	1.42	8120	13920	900	0.96	15	0.1	1.13	3360	5760	380	0.55	15	0.2	0.852	1400	2400	160	0.18
15	0	1.42	10500	18000	1200	0.97	15	0.1	1.13	3920	6720	440	0.58	15	0.2	0.852	1960	3360	215	0.23
15	0	1.42	11620	19920	1320	0.97	15	0.1	1.13	4900	8400	550	0.61	15	0.2	0.852	2380	4080	251	0.28
15	0	1.42	13020	22320	1480	0.98	15	0.1	1.13	5880	10080	650	0.64	15	0.2	0.852	2800	4080	320	0.31
15	0.1	0.001	560	960	60	0.12	15	0.1	1.13	8120	13920	900	0.67	15	0.2	0.852	3360	5760	380	0.35
15	0.1	0.001	980	1680	112	0.21	15	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.69	15	0.2	0.852	3920	6720	440	0.38

15	0.2	0.852	4900	8400	550	0.41	15	0.3	0.568	2380	4080	251	0.13	19	0	0.284	560	960	60	0.14
15	0.2	0.852	5880	10080	650	0.43	15	0.3	0.568	2800	4080	320	0.15	19	0	0.284	980	1680	112	0.24
15	0.2	0.852	8120	13920	900	0.48	15	0.3	0.568	3360	5760	380	0.17	19	0	0.284	1400	2400	160	0.34
15	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.51	15	0.3	0.568	3920	6720	440	0.20	19	0	0.284	1960	3360	215	0.53
15	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.52	15	0.3	0.568	4900	8400	550	0.22	19	0	0.284	2380	4080	251	0.58
15	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.52	15	0.3	0.568	5880	10080	650	0.25	19	0	0.284	2800	4080	320	0.67
15	0.2	1.13	560	960	60	0.10	15	0.3	0.568	8120	13920	900	0.29	19	0	0.284	3360	5760	380	0.77
15	0.2	1.13	980	1680	112	0.13	15	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.32	19	0	0.284	3920	6720	440	0.87
15	0.2	1.13	1400	2400	160	0.20	15	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.32	19	0	0.284	4900	8400	550	0.93
15	0.2	1.13	1960	3360	215	0.27	15	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.33	19	0	0.284	5880	10080	650	0.93
15	0.2	1.13	2380	4080	251	0.30	15	0.3	0.852	560	960	60	0.06	19	0	0.284	8120	13920	900	0.96
15	0.2	1.13	2800	4080	320	0.32	15	0.3	0.852	980	1680	112	0.09	19	0	0.284	10500	18000	1200	0.95
15	0.2	1.13	3360	5760	380	0.37	15	0.3	0.852	1400	2400	160	0.10	19	0	0.284	11620	19920	1320	0.96
15	0.2	1.13	3920	6720	440	0.39	15	0.3	0.852	1960	3360	215	0.12	19	0	0.284	13020	22320	1480	0.96
15	0.2	1.13	4900	8400	550	0.43	15	0.3	0.852	2380	4080	251	0.15	19	0	0.568	560	960	60	0.14
15	0.2	1.13	5880	10080	650	0.45	15	0.3	0.852	2800	4080	320	0.16	19	0	0.568	980	1680	112	0.24
15	0.2	1.13	8120	13920	900	0.49	15	0.3	0.852	3360	5760	380	0.18	19	0	0.568	1400	2400	160	0.34
15	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.51	15	0.3	0.852	3920	6720	440	0.21	19	0	0.568	1960	3360	215	0.47
15	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.52	15	0.3	0.852	4900	8400	550	0.24	19	0	0.568	2380	4080	251	0.58
15	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.53	15	0.3	0.852	5880	10080	650	0.26	19	0	0.568	2800	4080	320	0.67
15	0.2	1.42	560	960	60	0.09	15	0.3	0.852	8120	13920	900	0.30	19	0	0.568	3360	5760	380	0.77
15	0.2	1.42	980	1680	112	0.14	15	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.33	19	0	0.568	3920	6720	440	0.87
15	0.2	1.42	1400	2400	160	0.21	15	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.33	19	0	0.568	4900	8400	550	0.93
15	0.2	1.42	1960	3360	215	0.27	15	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.34	19	0	0.568	5880	10080	650	0.93
15	0.2	1.42	2380	4080	251	0.33	15	0.3	1.13	560	960	60	0.06	19	0	0.568	8120	13920	900	0.96
15	0.2	1.42	2800	4080	320	0.35	15	0.3	1.13	980	1680	112	0.09	19	0	0.568	10500	18000	1200	0.95
15	0.2	1.42	3360	5760	380	0.38	15	0.3	1.13	1400	2400	160	0.14	19	0	0.568	11620	19920	1320	0.96
15	0.2	1.42	3920	6720	440	0.40	15	0.3	1.13	1960	3360	215	0.17	19	0	0.568	13020	22320	1480	0.96
15	0.2	1.42	4900	8400	550	0.44	15	0.3	1.13	2380	4080	251	0.19	19	0	0.852	560	960	60	0.14
15	0.2	1.42	5880	10080	650	0.45	15	0.3	1.13	2800	4080	320	0.20	19	0	0.852	980	1680	112	0.24
15	0.2	1.42	8120	13920	900	0.49	15	0.3	1.13	3360	5760	380	0.23	19	0	0.852	1400	2400	160	0.34
15	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.52	15	0.3	1.13	3920	6720	440	0.24	19	0	0.852	1960	3360	215	0.47
15	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.52	15	0.3	1.13	4900	8400	550	0.27	19	0	0.852	2380	4080	251	0.58
15	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.52	15	0.3	1.13	5880	10080	650	0.29	19	0	0.852	2800	4080	320	0.67
15	0.3	0.001	560	960	60	0.03	15	0.3	1.13	8120	13920	900	0.33	19	0	0.852	3360	5760	380	0.77
15	0.3	0.001	980	1680	112	0.03	15	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.35	19	0	0.852	3920	6720	440	0.87
15	0.3	0.001	1400	2400	160	0.04	15	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.33	19	0	0.852	4900	8400	550	0.93
15	0.3	0.001	1960	3360	215	0.07	15	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.35	19	0	0.852	5880	10080	650	0.93
15	0.3	0.001	2380	4080	251	0.08	15	0.3	1.42	560	960	60	0.07	19	0	0.852	8120	13920	900	0.96
15	0.3	0.001	2800	4080	320	0.09	15	0.3	1.42	980	1680	112	0.09	19	0	0.852	10500	18000	1200	0.95
15	0.3	0.001	3360	5760	380	0.11	15	0.3	1.42	1400	2400	160	0.15	19	0	0.852	11620	19920	1320	0.96
15	0.3	0.001	3920	6720	440	0.13	15	0.3	1.42	1960	3360	215	0.17	19	0	0.852	13020	22320	1480	0.96
15	0.3	0.001	4900	8400	550	0.16	15	0.3	1.42	2380	4080	251	0.20	19	0	1.13	560	960	60	0.15
15	0.3	0.001	5880	10080	650	0.18	15	0.3	1.42	2800	4080	320	0.22	19	0	1.13	980	1680	112	0.24
15	0.3	0.001	8120	13920	900	0.24	15	0.3	1.42	3360	5760	380	0.23	19	0	1.13	1400	2400	160	0.36
15	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.27	15	0.3	1.42	3920	6720	440	0.25	19	0	1.13	1960	3360	215	0.47
15	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.28	15	0.3	1.42	4900	8400	550	0.29	19	0	1.13	2380	4080	251	0.58
15	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.27	15	0.3	1.42	5880	10080	650	0.32	19	0	1.13	2800	4080	320	0.67
15	0.3	0.284	560	960	60	0.04	15	0.3	1.42	8120	13920	900	0.34	19	0	1.13	3360	5760	380	0.77
15	0.3	0.284	980	1680	112	0.06	15	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.35	19	0	1.13	3920	6720	440	0.87
15	0.3	0.284	1400	2400	160	0.08	15	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.34	19	0	1.13	4900	8400	550	0.93
15	0.3	0.284	1960	3360	215	0.10	15	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.36	19	0	1.13	5880	10080	650	0.93
15	0.3	0.284	2380	4080	251	0.10	19	0	0.001	560	960	60	0.13	19	0	1.13	8120	13920	900	0.96
15	0.3	0.284	2800	4080	320	0.13	19	0	0.001	980	1680	112	0.24	19	0	1.13	10500	18000	1200	0.95
15	0.3	0.284	3360	5760	380	0.14	19	0	0.001	1400	2400	160	0.34	19	0	1.13	11620	19920	1320	0.96
15	0.3	0.284	3920	6720	440	0.16	19	0	0.001	1960	3360	215	0.47	19	0	1.13	13020	22320	1480	0.96
15	0.3	0.284	4900	8400	550	0.19	19	0	0.001	2380	4080	251	0.58	19	0	1.42	560	960	60	0.15
15	0.3	0.284	5880	10080	650	0.23	19	0	0.001	2800	4080	320	0.67	19	0	1.42	980	1680	112	0.24
15	0.3	0.284	8120	13920	900	0.27	19	0	0.001	3360	5760	380	0.77	19	0	1.42	1400	2400	160	0.34
15	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.30	19	0	0.001	3920	6720	440	0.87	19	0	1.42	1960	3360	215	0.47
15	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.31	19	0	0.001	4900	8400	550	0.93	19	0	1.42	2380	4080	251	0.58
15	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.32	19	0	0.001	5880	10080	650	0.93	19	0	1.42	2800	4080	320	0.67
15	0.3	0.568	560	960	60	0.05	19	0	0.001	8120	13920	900	0.96	19	0	1.42	3360	5760	380	0.77
15	0.3	0.568	980	1680	112	0.08	19	0	0.001	10500	18000	1200	0.95	19	0	1.42	3920	6720	440	0.87
15	0.3	0.568	1400	2400	160	0.10	19	0	0.001	11620	19920	1320	0.96	19	0	1.42	4900	8400	550	0.93
15	0.3	0.568	1960	3360	215	0.11	19	0	0.001	13020	22320	1480	0.96	19	0	1.42	5880	10080	650	0.93

19	0	1.42	8120	13920	900	0.96	19	0.1	1.13	3360	5760	380	0.44	19	0.2	0.852	1400	2400	160	0.14
19	0	1.42	10500	18000	1200	0.95	19	0.1	1.13	3920	6720	440	0.48	19	0.2	0.852	1960	3360	215	0.16
19	0	1.42	11620	19920	1320	0.96	19	0.1	1.13	4900	8400	550	0.53	19	0.2	0.852	2380	4080	251	0.20
19	0	1.42	13020	22320	1480	0.96	19	0.1	1.13	5880	10080	650	0.56	19	0.2	0.852	2800	4080	320	0.22
19	0.1	0.001	560	960	60	0.08	19	0.1	1.13	8120	13920	900	0.62	19	0.2	0.852	3360	5760	380	0.24
19	0.1	0.001	980	1680	112	0.12	19	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.65	19	0.2	0.852	3920	6720	440	0.28
19	0.1	0.001	1400	2400	160	0.17	19	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.66	19	0.2	0.852	4900	8400	550	0.32
19	0.1	0.001	1960	3360	215	0.25	19	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.67	19	0.2	0.852	5880	10080	650	0.36
19	0.1	0.001	2380	4080	251	0.30	19	0.1	1.42	560	960	60	0.10	19	0.2	0.852	8120	13920	900	0.41
19	0.1	0.001	2800	4080	320	0.35	19	0.1	1.42	980	1680	112	0.15	19	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.46
19	0.1	0.001	3360	5760	380	0.38	19	0.1	1.42	1400	2400	160	0.22	19	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.47
19	0.1	0.001	3920	6720	440	0.46	19	0.1	1.42	1960	3360	215	0.30	19	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.48
19	0.1	0.001	4900	8400	550	0.51	19	0.1	1.42	2380	4080	251	0.36	19	0.2	1.13	560	960	60	0.06
19	0.1	0.001	5880	10080	650	0.55	19	0.1	1.42	2800	4080	320	0.39	19	0.2	1.13	980	1680	112	0.10
19	0.1	0.001	8120	13920	900	0.61	19	0.1	1.42	3360	5760	380	0.45	19	0.2	1.13	1400	2400	160	0.15
19	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.64	19	0.1	1.42	3920	6720	440	0.49	19	0.2	1.13	1960	3360	215	0.18
19	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.66	19	0.1	1.42	4900	8400	550	0.53	19	0.2	1.13	2380	4080	251	0.21
19	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.67	19	0.1	1.42	5880	10080	650	0.56	19	0.2	1.13	2800	4080	320	0.25
19	0.1	0.284	560	960	60	0.09	19	0.1	1.42	8120	13920	900	0.61	19	0.2	1.13	3360	5760	380	0.29
19	0.1	0.284	980	1680	112	0.14	19	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.65	19	0.2	1.13	3920	6720	440	0.31
19	0.1	0.284	1400	2400	160	0.21	19	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.66	19	0.2	1.13	4900	8400	550	0.35
19	0.1	0.284	1960	3360	215	0.26	19	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.67	19	0.2	1.13	5880	10080	650	0.38
19	0.1	0.284	2380	4080	251	0.31	19	0.2	0.001	560	960	60	0.04	19	0.2	1.13	8120	13920	900	0.43
19	0.1	0.284	2800	4080	320	0.35	19	0.2	0.001	980	1680	112	0.06	19	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.46
19	0.1	0.284	3360	5760	380	0.41	19	0.2	0.001	1400	2400	160	0.08	19	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.47
19	0.1	0.284	3920	6720	440	0.46	19	0.2	0.001	1960	3360	215	0.11	19	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.48
19	0.1	0.284	4900	8400	550	0.52	19	0.2	0.001	2380	4080	251	0.13	19	0.2	1.42	560	960	60	0.06
19	0.1	0.284	5880	10080	650	0.56	19	0.2	0.001	2800	4080	320	0.16	19	0.2	1.42	980	1680	112	0.11
19	0.1	0.284	8120	13920	900	0.61	19	0.2	0.001	3360	5760	380	0.19	19	0.2	1.42	1400	2400	160	0.15
19	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.65	19	0.2	0.001	3920	6720	440	0.22	19	0.2	1.42	1960	3360	215	0.20
19	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.66	19	0.2	0.001	4900	8400	550	0.28	19	0.2	1.42	2380	4080	251	0.23
19	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.67	19	0.2	0.001	5880	10080	650	0.31	19	0.2	1.42	2800	4080	320	0.25
19	0.1	0.568	560	960	60	0.09	19	0.2	0.001	8120	13920	900	0.38	19	0.2	1.42	3360	5760	380	0.28
19	0.1	0.568	980	1680	112	0.15	19	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.43	19	0.2	1.42	3920	6720	440	0.31
19	0.1	0.568	1400	2400	160	0.20	19	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.44	19	0.2	1.42	4900	8400	550	0.36
19	0.1	0.568	1960	3360	215	0.27	19	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.46	19	0.2	1.42	5880	10080	650	0.38
19	0.1	0.568	2380	4080	251	0.32	19	0.2	0.284	560	960	60	0.05	19	0.2	1.42	8120	13920	900	0.44
19	0.1	0.568	2800	4080	320	0.38	19	0.2	0.284	980	1680	112	0.08	19	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.47
19	0.1	0.568	3360	5760	380	0.43	19	0.2	0.284	1400	2400	160	0.12	19	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.48
19	0.1	0.568	3920	6720	440	0.47	19	0.2	0.284	1960	3360	215	0.13	19	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.49
19	0.1	0.568	4900	8400	550	0.53	19	0.2	0.284	2380	4080	251	0.16	19	0.3	0.001	560	960	60	0.01
19	0.1	0.568	5880	10080	650	0.56	19	0.2	0.284	2800	4080	320	0.20	19	0.3	0.001	980	1680	112	0.02
19	0.1	0.568	8120	13920	900	0.61	19	0.2	0.284	3360	5760	380	0.22	19	0.3	0.001	1400	2400	160	0.03
19	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.65	19	0.2	0.284	3920	6720	440	0.24	19	0.3	0.001	1960	3360	215	0.04
19	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.66	19	0.2	0.284	4900	8400	550	0.29	19	0.3	0.001	2380	4080	251	0.04
19	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.67	19	0.2	0.284	5880	10080	650	0.33	19	0.3	0.001	2800	4080	320	0.07
19	0.1	0.852	560	960	60	0.11	19	0.2	0.284	8120	13920	900	0.39	19	0.3	0.001	3360	5760	380	0.06
19	0.1	0.852	980	1680	112	0.15	19	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.44	19	0.3	0.001	3920	6720	440	0.07
19	0.1	0.852	1400	2400	160	0.21	19	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.46	19	0.3	0.001	4900	8400	550	0.11
19	0.1	0.852	1960	3360	215	0.29	19	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.47	19	0.3	0.001	5880	10080	650	0.12
19	0.1	0.852	2380	4080	251	0.32	19	0.2	0.568	560	960	60	0.07	19	0.3	0.001	8120	13920	900	0.16
19	0.1	0.852	2800	4080	320	0.38	19	0.2	0.568	980	1680	112	0.10	19	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.21
19	0.1	0.852	3360	5760	380	0.43	19	0.2	0.568	1400	2400	160	0.12	19	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.22
19	0.1	0.852	3920	6720	440	0.48	19	0.2	0.568	1960	3360	215	0.17	19	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.22
19	0.1	0.852	4900	8400	550	0.53	19	0.2	0.568	2380	4080	251	0.19	19	0.3	0.284	560	960	60	0.04
19	0.1	0.852	5880	10080	650	0.56	19	0.2	0.568	2800	4080	320	0.20	19	0.3	0.284	980	1680	112	0.05
19	0.1	0.852	8120	13920	900	0.61	19	0.2	0.568	3360	5760	380	0.23	19	0.3	0.284	1400	2400	160	0.06
19	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.65	19	0.2	0.568	3920	6720	440	0.26	19	0.3	0.284	1960	3360	215	0.07
19	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.66	19	0.2	0.568	4900	8400	550	0.31	19	0.3	0.284	2380	4080	251	0.08
19	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.67	19	0.2	0.568	5880	10080	650	0.35	19	0.3	0.284	2800	4080	320	0.09
19	0.1	1.13	560	960	60	0.10	19	0.2	0.568	8120	13920	900	0.41	19	0.3	0.284	3360	5760	380	0.11
19	0.1	1.13	980	1680	112	0.16	19	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.45	19	0.3	0.284	3920	6720	440	0.11
19	0.1	1.13	1400	2400	160	0.24	19	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.46	19	0.3	0.284	4900	8400	550	0.14
19	0.1	1.13	1960	3360	215	0.28	19	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.48	19	0.3	0.284	5880	10080	650	0.17
19	0.1	1.13	2380	4080	251	0.34	19	0.2	0.852	560	960	60	0.07	19	0.3	0.284	8120	13920	900	0.21
19	0.1	1.13	2800	4080	320	0.38	19	0.2	0.852	980	1680	112	0.09	19	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.24

19	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.27	23	0	0.001	4900	8400	550	0.78	23	0	1.42	2380	4080	251	0.41
19	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.25	23	0	0.001	5880	10080	650	0.90	23	0	1.42	2800	4080	320	0.48
19	0.3	0.568	560	960	60	0.04	23	0	0.001	8120	13920	900	0.95	23	0	1.42	3360	5760	380	0.56
19	0.3	0.568	980	1680	112	0.07	23	0	0.001	10500	18000	1200	0.93	23	0	1.42	3920	6720	440	0.64
19	0.3	0.568	1400	2400	160	0.07	23	0	0.001	11620	19920	1320	0.94	23	0	1.42	4900	8400	550	0.78
19	0.3	0.568	1960	3360	215	0.09	23	0	0.001	13020	22320	1480	0.94	23	0	1.42	5880	10080	650	0.90
19	0.3	0.568	2380	4080	251	0.11	23	0	0.284	560	960	60	0.10	23	0	1.42	8120	13920	900	0.95
19	0.3	0.568	2800	4080	320	0.11	23	0	0.284	980	1680	112	0.17	23	0	1.42	10500	18000	1200	0.93
19	0.3	0.568	3360	5760	380	0.12	23	0	0.284	1400	2400	160	0.24	23	0	1.42	11620	19920	1320	0.94
19	0.3	0.568	3920	6720	440	0.14	23	0	0.284	1960	3360	215	0.34	23	0	1.42	13020	22320	1480	0.95
19	0.3	0.568	4900	8400	550	0.16	23	0	0.284	2380	4080	251	0.41	23	0.1	0.001	560	960	60	0.05
19	0.3	0.568	5880	10080	650	0.18	23	0	0.284	2800	4080	320	0.48	23	0.1	0.001	980	1680	112	0.09
19	0.3	0.568	8120	13920	900	0.23	23	0	0.284	3360	5760	380	0.56	23	0.1	0.001	1400	2400	160	0.12
19	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.28	23	0	0.284	3920	6720	440	0.64	23	0.1	0.001	1960	3360	215	0.17
19	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.28	23	0	0.284	4900	8400	550	0.78	23	0.1	0.001	2380	4080	251	0.21
19	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.29	23	0	0.284	5880	10080	650	0.90	23	0.1	0.001	2800	4080	320	0.25
19	0.3	0.852	560	960	60	0.05	23	0	0.284	8120	13920	900	0.95	23	0.1	0.001	3360	5760	380	0.29
19	0.3	0.852	980	1680	112	0.06	23	0	0.284	10500	18000	1200	0.93	23	0.1	0.001	3920	6720	440	0.34
19	0.3	0.852	1400	2400	160	0.09	23	0	0.284	11620	19920	1320	0.94	23	0.1	0.001	4900	8400	550	0.42
19	0.3	0.852	1960	3360	215	0.10	23	0	0.284	13020	22320	1480	0.94	23	0.1	0.001	5880	10080	650	0.47
19	0.3	0.852	2380	4080	251	0.12	23	0	0.568	560	960	60	0.10	23	0.1	0.001	8120	13920	900	0.55
19	0.3	0.852	2800	4080	320	0.12	23	0	0.568	980	1680	112	0.17	23	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.59
19	0.3	0.852	3360	5760	380	0.14	23	0	0.568	1400	2400	160	0.24	23	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.61
19	0.3	0.852	3920	6720	440	0.15	23	0	0.568	1960	3360	215	0.34	23	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.63
19	0.3	0.852	4900	8400	550	0.19	23	0	0.568	2380	4080	251	0.41	23	0.1	0.284	560	960	60	0.06
19	0.3	0.852	5880	10080	650	0.19	23	0	0.568	2800	4080	320	0.48	23	0.1	0.284	980	1680	112	0.10
19	0.3	0.852	8120	13920	900	0.25	23	0	0.568	3360	5760	380	0.56	23	0.1	0.284	1400	2400	160	0.14
19	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.30	23	0	0.568	3920	6720	440	0.64	23	0.1	0.284	1960	3360	215	0.18
19	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.30	23	0	0.568	4900	8400	550	0.78	23	0.1	0.284	2380	4080	251	0.22
19	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.31	23	0	0.568	5880	10080	650	0.90	23	0.1	0.284	2800	4080	320	0.25
19	0.3	1.13	560	960	60	0.05	23	0	0.568	8120	13920	900	0.95	23	0.1	0.284	3360	5760	380	0.32
19	0.3	1.13	980	1680	112	0.07	23	0	0.568	10500	18000	1200	0.93	23	0.1	0.284	3920	6720	440	0.34
19	0.3	1.13	1400	2400	160	0.10	23	0	0.568	11620	19920	1320	0.94	23	0.1	0.284	4900	8400	550	0.43
19	0.3	1.13	1960	3360	215	0.12	23	0	0.568	13020	22320	1480	0.95	23	0.1	0.284	5880	10080	650	0.48
19	0.3	1.13	2380	4080	251	0.15	23	0	0.852	560	960	60	0.10	23	0.1	0.284	8120	13920	900	0.55
19	0.3	1.13	2800	4080	320	0.17	23	0	0.852	980	1680	112	0.17	23	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.59
19	0.3	1.13	3360	5760	380	0.17	23	0	0.852	1400	2400	160	0.24	23	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.61
19	0.3	1.13	3920	6720	440	0.18	23	0	0.852	1960	3360	215	0.34	23	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.63
19	0.3	1.13	4900	8400	550	0.22	23	0	0.852	2380	4080	251	0.41	23	0.1	0.568	560	960	60	0.06
19	0.3	1.13	5880	10080	650	0.24	23	0	0.852	2800	4080	320	0.48	23	0.1	0.568	980	1680	112	0.12
19	0.3	1.13	8120	13920	900	0.29	23	0	0.852	3360	5760	380	0.56	23	0.1	0.568	1400	2400	160	0.15
19	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.30	23	0	0.852	3920	6720	440	0.64	23	0.1	0.568	1960	3360	215	0.19
19	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.30	23	0	0.852	4900	8400	550	0.78	23	0.1	0.568	2380	4080	251	0.23
19	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.32	23	0	0.852	5880	10080	650	0.90	23	0.1	0.568	2800	4080	320	0.27
19	0.3	1.42	560	960	60	0.05	23	0	0.852	8120	13920	900	0.95	23	0.1	0.568	3360	5760	380	0.32
19	0.3	1.42	980	1680	112	0.08	23	0	0.852	10500	18000	1200	0.93	23	0.1	0.568	3920	6720	440	0.37
19	0.3	1.42	1400	2400	160	0.11	23	0	0.852	11620	19920	1320	0.94	23	0.1	0.568	4900	8400	550	0.43
19	0.3	1.42	1960	3360	215	0.13	23	0	0.852	13020	22320	1480	0.95	23	0.1	0.568	5880	10080	650	0.49
19	0.3	1.42	2380	4080	251	0.16	23	0	1.13	560	960	60	0.10	23	0.1	0.568	8120	13920	900	0.56
19	0.3	1.42	2800	4080	320	0.17	23	0	1.13	980	1680	112	0.18	23	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.60
19	0.3	1.42	3360	5760	380	0.18	23	0	1.13	1400	2400	160	0.24	23	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.61
19	0.3	1.42	3920	6720	440	0.22	23	0	1.13	1960	3360	215	0.36	23	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.63
19	0.3	1.42	4900	8400	550	0.23	23	0	1.13	2380	4080	251	0.41	23	0.1	0.852	560	960	60	0.08
19	0.3	1.42	5880	10080	650	0.25	23	0	1.13	2800	4080	320	0.48	23	0.1	0.852	980	1680	112	0.11
19	0.3	1.42	8120	13920	900	0.30	23	0	1.13	3360	5760	380	0.56	23	0.1	0.852	1400	2400	160	0.14
19	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.32	23	0	1.13	3920	6720	440	0.64	23	0.1	0.852	1960	3360	215	0.20
19	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.31	23	0	1.13	4900	8400	550	0.78	23	0.1	0.852	2380	4080	251	0.24
19	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.32	23	0	1.13	5880	10080	650	0.90	23	0.1	0.852	2800	4080	320	0.27
23	0	0.001	560	960	60	0.10	23	0	1.13	8120	13920	900	0.95	23	0.1	0.852	3360	5760	380	0.32
23	0	0.001	980	1680	112	0.17	23	0	1.13	10500	18000	1200	0.93	23	0.1	0.852	3920	6720	440	0.38
23	0	0.001	1400	2400	160	0.24	23	0	1.13	11620	19920	1320	0.94	23	0.1	0.852	4900	8400	550	0.44
23	0	0.001	1960	3360	215	0.34	23	0	1.13	13020	22320	1480	0.95	23	0.1	0.852	5880	10080	650	0.49
23	0	0.001	2380	4080	251	0.41	23	0	1.42	560	960	60	0.11	23	0.1	0.852	8120	13920	900	0.56
23	0	0.001	2800	4080	320	0.47	23	0	1.42	980	1680	112	0.17	23	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.60
23	0	0.001	3360	5760	380	0.56	23	0	1.42	1400	2400	160	0.24	23	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.61
23	0	0.001	3920	6720	440	0.64	23	0	1.42	1960	3360	215	0.34	23	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.63

23	0.1	1.13	560	960	60	0.07	23	0.2	0.568	8120	13920	900	0.34	23	0.3	0.284	3360	5760	380	0.08
23	0.1	1.13	980	1680	112	0.11	23	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.39	23	0.3	0.284	3920	6720	440	0.09
23	0.1	1.13	1400	2400	160	0.16	23	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.40	23	0.3	0.284	4900	8400	550	0.11
23	0.1	1.13	1960	3360	215	0.21	23	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.43	23	0.3	0.284	5880	10080	650	0.12
23	0.1	1.13	2380	4080	251	0.25	23	0.2	0.852	560	960	60	0.05	23	0.3	0.284	8120	13920	900	0.16
23	0.1	1.13	2800	4080	320	0.28	23	0.2	0.852	980	1680	112	0.07	23	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.19
23	0.1	1.13	3360	5760	380	0.34	23	0.2	0.852	1400	2400	160	0.10	23	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.21
23	0.1	1.13	3920	6720	440	0.39	23	0.2	0.852	1960	3360	215	0.13	23	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.21
23	0.1	1.13	4900	8400	550	0.44	23	0.2	0.852	2380	4080	251	0.14	23	0.3	0.568	560	960	60	0.03
23	0.1	1.13	5880	10080	650	0.49	23	0.2	0.852	2800	4080	320	0.16	23	0.3	0.568	980	1680	112	0.05
23	0.1	1.13	8120	13920	900	0.56	23	0.2	0.852	3360	5760	380	0.18	23	0.3	0.568	1400	2400	160	0.06
23	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.60	23	0.2	0.852	3920	6720	440	0.21	23	0.3	0.568	1960	3360	215	0.08
23	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.61	23	0.2	0.852	4900	8400	550	0.25	23	0.3	0.568	2380	4080	251	0.08
23	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.63	23	0.2	0.852	5880	10080	650	0.29	23	0.3	0.568	2800	4080	320	0.09
23	0.1	1.42	560	960	60	0.07	23	0.2	0.852	8120	13920	900	0.37	23	0.3	0.568	3360	5760	380	0.10
23	0.1	1.42	980	1680	112	0.11	23	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.40	23	0.3	0.568	3920	6720	440	0.11
23	0.1	1.42	1400	2400	160	0.18	23	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.41	23	0.3	0.568	4900	8400	550	0.12
23	0.1	1.42	1960	3360	215	0.22	23	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.43	23	0.3	0.568	5880	10080	650	0.15
23	0.1	1.42	2380	4080	251	0.26	23	0.2	1.13	560	960	60	0.05	23	0.3	0.568	8120	13920	900	0.18
23	0.1	1.42	2800	4080	320	0.30	23	0.2	1.13	980	1680	112	0.08	23	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.21
23	0.1	1.42	3360	5760	380	0.34	23	0.2	1.13	1400	2400	160	0.11	23	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.24
23	0.1	1.42	3920	6720	440	0.38	23	0.2	1.13	1960	3360	215	0.14	23	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.26
23	0.1	1.42	4900	8400	550	0.45	23	0.2	1.13	2380	4080	251	0.17	23	0.3	0.852	560	960	60	0.04
23	0.1	1.42	5880	10080	650	0.49	23	0.2	1.13	2800	4080	320	0.20	23	0.3	0.852	980	1680	112	0.05
23	0.1	1.42	8120	13920	900	0.56	23	0.2	1.13	3360	5760	380	0.20	23	0.3	0.852	1400	2400	160	0.07
23	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.60	23	0.2	1.13	3920	6720	440	0.23	23	0.3	0.852	1960	3360	215	0.08
23	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.62	23	0.2	1.13	4900	8400	550	0.27	23	0.3	0.852	2380	4080	251	0.10
23	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.63	23	0.2	1.13	5880	10080	650	0.31	23	0.3	0.852	2800	4080	320	0.10
23	0.2	0.001	560	960	60	0.02	23	0.2	1.13	8120	13920	900	0.37	23	0.3	0.852	3360	5760	380	0.11
23	0.2	0.001	980	1680	112	0.04	23	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.41	23	0.3	0.852	3920	6720	440	0.12
23	0.2	0.001	1400	2400	160	0.06	23	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.42	23	0.3	0.852	4900	8400	550	0.14
23	0.2	0.001	1960	3360	215	0.08	23	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.44	23	0.3	0.852	5880	10080	650	0.16
23	0.2	0.001	2380	4080	251	0.10	23	0.2	1.42	560	960	60	0.06	23	0.3	0.852	8120	13920	900	0.20
23	0.2	0.001	2800	4080	320	0.11	23	0.2	1.42	980	1680	112	0.08	23	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.24
23	0.2	0.001	3360	5760	380	0.13	23	0.2	1.42	1400	2400	160	0.13	23	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.25
23	0.2	0.001	3920	6720	440	0.15	23	0.2	1.42	1960	3360	215	0.15	23	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.26
23	0.2	0.001	4900	8400	550	0.19	23	0.2	1.42	2380	4080	251	0.16	23	0.3	1.13	560	960	60	0.04
23	0.2	0.001	5880	10080	650	0.23	23	0.2	1.42	2800	4080	320	0.19	23	0.3	1.13	980	1680	112	0.05
23	0.2	0.001	8120	13920	900	0.31	23	0.2	1.42	3360	5760	380	0.22	23	0.3	1.13	1400	2400	160	0.08
23	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.36	23	0.2	1.42	3920	6720	440	0.26	23	0.3	1.13	1960	3360	215	0.11
23	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.37	23	0.2	1.42	4900	8400	550	0.29	23	0.3	1.13	2380	4080	251	0.12
23	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.39	23	0.2	1.42	5880	10080	650	0.32	23	0.3	1.13	2800	4080	320	0.13
23	0.2	0.284	560	960	60	0.04	23	0.2	1.42	8120	13920	900	0.38	23	0.3	1.13	3360	5760	380	0.14
23	0.2	0.284	980	1680	112	0.05	23	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.42	23	0.3	1.13	3920	6720	440	0.15
23	0.2	0.284	1400	2400	160	0.08	23	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.43	23	0.3	1.13	4900	8400	550	0.17
23	0.2	0.284	1960	3360	215	0.10	23	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.45	23	0.3	1.13	5880	10080	650	0.19
23	0.2	0.284	2380	4080	251	0.12	23	0.3	0.001	560	960	60	0.01	23	0.3	1.13	8120	13920	900	0.23
23	0.2	0.284	2800	4080	320	0.15	23	0.3	0.001	980	1680	112	0.02	23	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.26
23	0.2	0.284	3360	5760	380	0.16	23	0.3	0.001	1400	2400	160	0.02	23	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.26
23	0.2	0.284	3920	6720	440	0.18	23	0.3	0.001	1960	3360	215	0.03	23	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.29
23	0.2	0.284	4900	8400	550	0.22	23	0.3	0.001	2380	4080	251	0.03	23	0.3	1.42	560	960	60	0.04
23	0.2	0.284	5880	10080	650	0.26	23	0.3	0.001	2800	4080	320	0.04	23	0.3	1.42	980	1680	112	0.06
23	0.2	0.284	8120	13920	900	0.33	23	0.3	0.001	3360	5760	380	0.04	23	0.3	1.42	1400	2400	160	0.11
23	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.37	23	0.3	0.001	3920	6720	440	0.05	23	0.3	1.42	1960	3360	215	0.11
23	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.39	23	0.3	0.001	4900	8400	550	0.07	23	0.3	1.42	2380	4080	251	0.12
23	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.41	23	0.3	0.001	5880	10080	650	0.08	23	0.3	1.42	2800	4080	320	0.14
23	0.2	0.568	560	960	60	0.07	23	0.3	0.001	8120	13920	900	0.11	23	0.3	1.42	3360	5760	380	0.15
23	0.2	0.568	980	1680	112	0.07	23	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.14	23	0.3	1.42	3920	6720	440	0.17
23	0.2	0.568	1400	2400	160	0.09	23	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.16	23	0.3	1.42	4900	8400	550	0.18
23	0.2	0.568	1960	3360	215	0.12	23	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.17	23	0.3	1.42	5880	10080	650	0.21
23	0.2	0.568	2380	4080	251	0.13	23	0.3	0.284	560	960	60	0.03	23	0.3	1.42	8120	13920	900	0.24
23	0.2	0.568	2800	4080	320	0.16	23	0.3	0.284	980	1680	112	0.04	23	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.28
23	0.2	0.568	3360	5760	380	0.19	23	0.3	0.284	1400	2400	160	0.05	23	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.27
23	0.2	0.568	3920	6720	440	0.19	23	0.3	0.284	1960	3360	215	0.06	23	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.29
23	0.2	0.568	4900	8400	550	0.24	23	0.3	0.284	2380	4080	251	0.06	25	0	0.001	560	960	60	0.08
23	0.2	0.568	5880	10080	650	0.27	23	0.3	0.284	2800	4080	320	0.07	25	0	0.001	980	1680	112	0.14

25	0	0.001	1400	2400	160	0.20	25	0	1.13	11620	19920	1320	0.93	25	0.1	0.852	4900	8400	550	0.38
25	0	0.001	1960	3360	215	0.28	25	0	1.13	13020	22320	1480	0.93	25	0.1	0.852	5880	10080	650	0.43
25	0	0.001	2380	4080	251	0.34	25	0	1.42	560	960	60	0.09	25	0.1	0.852	8120	13920	900	0.52
25	0	0.001	2800	4080	320	0.40	25	0	1.42	980	1680	112	0.14	25	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.57
25	0	0.001	3360	5760	380	0.48	25	0	1.42	1400	2400	160	0.20	25	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.59
25	0	0.001	3920	6720	440	0.55	25	0	1.42	1960	3360	215	0.29	25	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.61
25	0	0.001	4900	8400	550	0.69	25	0	1.42	2380	4080	251	0.36	25	0.1	1.13	560	960	60	0.07
25	0	0.001	5880	10080	650	0.79	25	0	1.42	2800	4080	320	0.40	25	0.1	1.13	980	1680	112	0.10
25	0	0.001	8120	13920	900	0.93	25	0	1.42	3360	5760	380	0.48	25	0.1	1.13	1400	2400	160	0.15
25	0	0.001	10500	18000	1200	0.93	25	0	1.42	3920	6720	440	0.55	25	0.1	1.13	1960	3360	215	0.18
25	0	0.001	11620	19920	1320	0.93	25	0	1.42	4900	8400	550	0.69	25	0.1	1.13	2380	4080	251	0.22
25	0	0.001	13020	22320	1480	0.93	25	0	1.42	5880	10080	650	0.79	25	0.1	1.13	2800	4080	320	0.24
25	0	0.284	560	960	60	0.09	25	0	1.42	8120	13920	900	0.93	25	0.1	1.13	3360	5760	380	0.28
25	0	0.284	980	1680	112	0.14	25	0	1.42	10500	18000	1200	0.93	25	0.1	1.13	3920	6720	440	0.33
25	0	0.284	1400	2400	160	0.21	25	0	1.42	11620	19920	1320	0.93	25	0.1	1.13	4900	8400	550	0.40
25	0	0.284	1960	3360	215	0.29	25	0	1.42	13020	22320	1480	0.93	25	0.1	1.13	5880	10080	650	0.46
25	0	0.284	2380	4080	251	0.34	25	0.1	0.001	560	960	60	0.04	25	0.1	1.13	8120	13920	900	0.52
25	0	0.284	2800	4080	320	0.40	25	0.1	0.001	980	1680	112	0.07	25	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.57
25	0	0.284	3360	5760	380	0.48	25	0.1	0.001	1400	2400	160	0.10	25	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.59
25	0	0.284	3920	6720	440	0.55	25	0.1	0.001	1960	3360	215	0.15	25	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.60
25	0	0.284	4900	8400	550	0.69	25	0.1	0.001	2380	4080	251	0.18	25	0.1	1.42	560	960	60	0.07
25	0	0.284	5880	10080	650	0.79	25	0.1	0.001	2800	4080	320	0.21	25	0.1	1.42	980	1680	112	0.10
25	0	0.284	8120	13920	900	0.93	25	0.1	0.001	3360	5760	380	0.24	25	0.1	1.42	1400	2400	160	0.14
25	0	0.284	10500	18000	1200	0.93	25	0.1	0.001	3920	6720	440	0.29	25	0.1	1.42	1960	3360	215	0.19
25	0	0.284	11620	19920	1320	0.93	25	0.1	0.001	4900	8400	550	0.38	25	0.1	1.42	2380	4080	251	0.22
25	0	0.284	13020	22320	1480	0.93	25	0.1	0.001	5880	10080	650	0.42	25	0.1	1.42	2800	4080	320	0.25
25	0	0.568	560	960	60	0.09	25	0.1	0.001	8120	13920	900	0.51	25	0.1	1.42	3360	5760	380	0.30
25	0	0.568	980	1680	112	0.14	25	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.56	25	0.1	1.42	3920	6720	440	0.34
25	0	0.568	1400	2400	160	0.21	25	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.58	25	0.1	1.42	4900	8400	550	0.39
25	0	0.568	1960	3360	215	0.29	25	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.60	25	0.1	1.42	5880	10080	650	0.46
25	0	0.568	2380	4080	251	0.35	25	0.1	0.284	560	960	60	0.05	25	0.1	1.42	8120	13920	900	0.53
25	0	0.568	2800	4080	320	0.40	25	0.1	0.284	980	1680	112	0.08	25	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.57
25	0	0.568	3360	5760	380	0.48	25	0.1	0.284	1400	2400	160	0.11	25	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.59
25	0	0.568	3920	6720	440	0.55	25	0.1	0.284	1960	3360	215	0.16	25	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.61
25	0	0.568	4900	8400	550	0.69	25	0.1	0.284	2380	4080	251	0.20	25	0.2	0.001	560	960	60	0.02
25	0	0.568	5880	10080	650	0.79	25	0.1	0.284	2800	4080	320	0.21	25	0.2	0.001	980	1680	112	0.04
25	0	0.568	8120	13920	900	0.93	25	0.1	0.284	3360	5760	380	0.26	25	0.2	0.001	1400	2400	160	0.05
25	0	0.568	10500	18000	1200	0.93	25	0.1	0.284	3920	6720	440	0.30	25	0.2	0.001	1960	3360	215	0.07
25	0	0.568	11620	19920	1320	0.93	25	0.1	0.284	4900	8400	550	0.38	25	0.2	0.001	2380	4080	251	0.09
25	0	0.568	13020	22320	1480	0.93	25	0.1	0.284	5880	10080	650	0.43	25	0.2	0.001	2800	4080	320	0.09
25	0	0.852	560	960	60	0.08	25	0.1	0.284	8120	13920	900	0.52	25	0.2	0.001	3360	5760	380	0.11
25	0	0.852	980	1680	112	0.15	25	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.57	25	0.2	0.001	3920	6720	440	0.13
25	0	0.852	1400	2400	160	0.21	25	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.58	25	0.2	0.001	4900	8400	550	0.16
25	0	0.852	1960	3360	215	0.29	25	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.60	25	0.2	0.001	5880	10080	650	0.19
25	0	0.852	2380	4080	251	0.34	25	0.1	0.568	560	960	60	0.06	25	0.2	0.001	8120	13920	900	0.26
25	0	0.852	2800	4080	320	0.40	25	0.1	0.568	980	1680	112	0.09	25	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.33
25	0	0.852	3360	5760	380	0.48	25	0.1	0.568	1400	2400	160	0.12	25	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.35
25	0	0.852	3920	6720	440	0.55	25	0.1	0.568	1960	3360	215	0.16	25	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.37
25	0	0.852	4900	8400	550	0.69	25	0.1	0.568	2380	4080	251	0.20	25	0.2	0.284	560	960	60	0.04
25	0	0.852	5880	10080	650	0.79	25	0.1	0.568	2800	4080	320	0.24	25	0.2	0.284	980	1680	112	0.06
25	0	0.852	8120	13920	900	0.93	25	0.1	0.568	3360	5760	380	0.27	25	0.2	0.284	1400	2400	160	0.06
25	0	0.852	10500	18000	1200	0.93	25	0.1	0.568	3920	6720	440	0.32	25	0.2	0.284	1960	3360	215	0.08
25	0	0.852	11620	19920	1320	0.93	25	0.1	0.568	4900	8400	550	0.38	25	0.2	0.284	2380	4080	251	0.11
25	0	0.852	13020	22320	1480	0.93	25	0.1	0.568	5880	10080	650	0.43	25	0.2	0.284	2800	4080	320	0.12
25	0	1.13	560	960	60	0.09	25	0.1	0.568	8120	13920	900	0.52	25	0.2	0.284	3360	5760	380	0.13
25	0	1.13	980	1680	112	0.16	25	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.57	25	0.2	0.284	3920	6720	440	0.15
25	0	1.13	1400	2400	160	0.20	25	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.59	25	0.2	0.284	4900	8400	550	0.19
25	0	1.13	1960	3360	215	0.29	25	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.60	25	0.2	0.284	5880	10080	650	0.23
25	0	1.13	2380	4080	251	0.34	25	0.1	0.852	560	960	60	0.06	25	0.2	0.284	8120	13920	900	0.30
25	0	1.13	2800	4080	320	0.40	25	0.1	0.852	980	1680	112	0.10	25	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.34
25	0	1.13	3360	5760	380	0.48	25	0.1	0.852	1400	2400	160	0.13	25	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.37
25	0	1.13	3920	6720	440	0.55	25	0.1	0.852	1960	3360	215	0.18	25	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.38
25	0	1.13	4900	8400	550	0.69	25	0.1	0.852	2380	4080	251	0.21	25	0.2	0.568	560	960	60	0.05
25	0	1.13	5880	10080	650	0.79	25	0.1	0.852	2800	4080	320	0.24	25	0.2	0.568	980	1680	112	0.07
25	0	1.13	8120	13920	900	0.93	25	0.1	0.852	3360	5760	380	0.29	25	0.2	0.568	1400	2400	160	0.08
25	0	1.13	10500	18000	1200	0.93	25	0.1	0.852	3920	6720	440	0.32	25	0.2	0.568	1960	3360	215	0.10

25	0.2	0.568	2380	4080	251	0.12	25	0.3	0.284	560	960	60	0.03	25	0.3	1.42	8120	13920	900	0.23
25	0.2	0.568	2800	4080	320	0.13	25	0.3	0.284	980	1680	112	0.03	25	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.26
25	0.2	0.568	3360	5760	380	0.16	25	0.3	0.284	1400	2400	160	0.04	25	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.25
25	0.2	0.568	3920	6720	440	0.17	25	0.3	0.284	1960	3360	215	0.05	25	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.26
25	0.2	0.568	4900	8400	550	0.20	25	0.3	0.284	2380	4080	251	0.05	27	0	0.001	560	960	60	0.07
25	0.2	0.568	5880	10080	650	0.25	25	0.3	0.284	2800	4080	320	0.07	27	0	0.001	980	1680	112	0.12
25	0.2	0.568	8120	13920	900	0.31	25	0.3	0.284	3360	5760	380	0.07	27	0	0.001	1400	2400	160	0.17
25	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.37	25	0.3	0.284	3920	6720	440	0.08	27	0	0.001	1960	3360	215	0.24
25	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.38	25	0.3	0.284	4900	8400	550	0.09	27	0	0.001	2380	4080	251	0.29
25	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.39	25	0.3	0.284	5880	10080	650	0.11	27	0	0.001	2800	4080	320	0.34
25	0.2	0.852	560	960	60	0.05	25	0.3	0.284	8120	13920	900	0.14	27	0	0.001	3360	5760	380	0.41
25	0.2	0.852	980	1680	112	0.06	25	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.16	27	0	0.001	3920	6720	440	0.48
25	0.2	0.852	1400	2400	160	0.09	25	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.17	27	0	0.001	4900	8400	550	0.58
25	0.2	0.852	1960	3360	215	0.11	25	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.19	27	0	0.001	5880	10080	650	0.69
25	0.2	0.852	2380	4080	251	0.13	25	0.3	0.568	560	960	60	0.03	27	0	0.001	8120	13920	900	0.86
25	0.2	0.852	2800	4080	320	0.16	25	0.3	0.568	980	1680	112	0.04	27	0	0.001	10500	18000	1200	0.93
25	0.2	0.852	3360	5760	380	0.16	25	0.3	0.568	1400	2400	160	0.06	27	0	0.001	11620	19920	1320	0.93
25	0.2	0.852	3920	6720	440	0.18	25	0.3	0.568	1960	3360	215	0.07	27	0	0.001	13020	22320	1480	0.92
25	0.2	0.852	4900	8400	550	0.22	25	0.3	0.568	2380	4080	251	0.07	27	0	0.284	560	960	60	0.07
25	0.2	0.852	5880	10080	650	0.25	25	0.3	0.568	2800	4080	320	0.08	27	0	0.284	980	1680	112	0.12
25	0.2	0.852	8120	13920	900	0.33	25	0.3	0.568	3360	5760	380	0.09	27	0	0.284	1400	2400	160	0.17
25	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.37	25	0.3	0.568	3920	6720	440	0.10	27	0	0.284	1960	3360	215	0.24
25	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.39	25	0.3	0.568	4900	8400	550	0.11	27	0	0.284	2380	4080	251	0.29
25	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.41	25	0.3	0.568	5880	10080	650	0.13	27	0	0.284	2800	4080	320	0.34
25	0.2	1.13	560	960	60	0.05	25	0.3	0.568	8120	13920	900	0.17	27	0	0.284	3360	5760	380	0.41
25	0.2	1.13	980	1680	112	0.07	25	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.19	27	0	0.284	3920	6720	440	0.48
25	0.2	1.13	1400	2400	160	0.10	25	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.22	27	0	0.284	4900	8400	550	0.58
25	0.2	1.13	1960	3360	215	0.13	25	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.24	27	0	0.284	5880	10080	650	0.69
25	0.2	1.13	2380	4080	251	0.14	25	0.3	0.852	560	960	60	0.03	27	0	0.284	8120	13920	900	0.86
25	0.2	1.13	2800	4080	320	0.16	25	0.3	0.852	980	1680	112	0.04	27	0	0.284	10500	18000	1200	0.93
25	0.2	1.13	3360	5760	380	0.18	25	0.3	0.852	1400	2400	160	0.07	27	0	0.284	11620	19920	1320	0.93
25	0.2	1.13	3920	6720	440	0.20	25	0.3	0.852	1960	3360	215	0.08	27	0	0.284	13020	22320	1480	0.92
25	0.2	1.13	4900	8400	550	0.25	25	0.3	0.852	2380	4080	251	0.08	27	0	0.568	560	960	60	0.08
25	0.2	1.13	5880	10080	650	0.28	25	0.3	0.852	2800	4080	320	0.09	27	0	0.568	980	1680	112	0.13
25	0.2	1.13	8120	13920	900	0.34	25	0.3	0.852	3360	5760	380	0.10	27	0	0.568	1400	2400	160	0.17
25	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.38	25	0.3	0.852	3920	6720	440	0.11	27	0	0.568	1960	3360	215	0.24
25	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.40	25	0.3	0.852	4900	8400	550	0.12	27	0	0.568	2380	4080	251	0.29
25	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.41	25	0.3	0.852	5880	10080	650	0.15	27	0	0.568	2800	4080	320	0.35
25	0.2	1.42	560	960	60	0.05	25	0.3	0.852	8120	13920	900	0.18	27	0	0.568	3360	5760	380	0.41
25	0.2	1.42	980	1680	112	0.07	25	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.21	27	0	0.568	3920	6720	440	0.47
25	0.2	1.42	1400	2400	160	0.12	25	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.23	27	0	0.568	4900	8400	550	0.58
25	0.2	1.42	1960	3360	215	0.13	25	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.24	27	0	0.568	5880	10080	650	0.69
25	0.2	1.42	2380	4080	251	0.15	25	0.3	1.13	560	960	60	0.03	27	0	0.568	8120	13920	900	0.86
25	0.2	1.42	2800	4080	320	0.18	25	0.3	1.13	980	1680	112	0.05	27	0	0.568	10500	18000	1200	0.93
25	0.2	1.42	3360	5760	380	0.20	25	0.3	1.13	1400	2400	160	0.08	27	0	0.568	11620	19920	1320	0.93
25	0.2	1.42	3920	6720	440	0.22	25	0.3	1.13	1960	3360	215	0.09	27	0	0.568	13020	22320	1480	0.92
25	0.2	1.42	4900	8400	550	0.25	25	0.3	1.13	2380	4080	251	0.10	27	0	0.852	560	960	60	0.08
25	0.2	1.42	5880	10080	650	0.28	25	0.3	1.13	2800	4080	320	0.11	27	0	0.852	980	1680	112	0.12
25	0.2	1.42	8120	13920	900	0.35	25	0.3	1.13	3360	5760	380	0.13	27	0	0.852	1400	2400	160	0.17
25	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.40	25	0.3	1.13	3920	6720	440	0.14	27	0	0.852	1960	3360	215	0.26
25	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.40	25	0.3	1.13	4900	8400	550	0.15	27	0	0.852	2380	4080	251	0.29
25	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.42	25	0.3	1.13	5880	10080	650	0.18	27	0	0.852	2800	4080	320	0.34
25	0.3	0.001	560	960	60	0.01	25	0.3	1.13	8120	13920	900	0.21	27	0	0.852	3360	5760	380	0.42
25	0.3	0.001	980	1680	112	0.02	25	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.24	27	0	0.852	3920	6720	440	0.47
25	0.3	0.001	1400	2400	160	0.02	25	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.24	27	0	0.852	4900	8400	550	0.58
25	0.3	0.001	1960	3360	215	0.02	25	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.26	27	0	0.852	5880	10080	650	0.69
25	0.3	0.001	2380	4080	251	0.03	25	0.3	1.42	560	960	60	0.04	27	0	0.852	8120	13920	900	0.86
25	0.3	0.001	2800	4080	320	0.03	25	0.3	1.42	980	1680	112	0.05	27	0	0.852	10500	18000	1200	0.93
25	0.3	0.001	3360	5760	380	0.04	25	0.3	1.42	1400	2400	160	0.10	27	0	0.852	11620	19920	1320	0.93
25	0.3	0.001	3920	6720	440	0.04	25	0.3	1.42	1960	3360	215	0.11	27	0	0.852	13020	22320	1480	0.92
25	0.3	0.001	4900	8400	550	0.05	25	0.3	1.42	2380	4080	251	0.12	27	0	1.13	560	960	60	0.10
25	0.3	0.001	5880	10080	650	0.06	25	0.3	1.42	2800	4080	320	0.12	27	0	1.13	980	1680	112	0.12
25	0.3	0.001	8120	13920	900	0.08	25	0.3	1.42	3360	5760	380	0.14	27	0	1.13	1400	2400	160	0.18
25	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.12	25	0.3	1.42	3920	6720	440	0.15	27	0	1.13	1960	3360	215	0.24
25	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.14	25	0.3	1.42	4900	8400	550	0.17	27	0	1.13	2380	4080	251	0.29
25	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.14	25	0.3	1.42	5880	10080	650	0.19	27	0	1.13	2800	4080	320	0.34

27	0	1.13	3360	5760	380	0.41	27	0.1	0.852	1400	2400	160	0.11	27	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.34
27	0	1.13	3920	6720	440	0.47	27	0.1	0.852	1960	3360	215	0.15	27	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.36
27	0	1.13	4900	8400	550	0.58	27	0.1	0.852	2380	4080	251	0.18	27	0.2	0.568	560	960	60	0.04
27	0	1.13	5880	10080	650	0.69	27	0.1	0.852	2800	4080	320	0.20	27	0.2	0.568	980	1680	112	0.06
27	0	1.13	8120	13920	900	0.86	27	0.1	0.852	3360	5760	380	0.24	27	0.2	0.568	1400	2400	160	0.07
27	0	1.13	10500	18000	1200	0.93	27	0.1	0.852	3920	6720	440	0.29	27	0.2	0.568	1960	3360	215	0.09
27	0	1.13	11620	19920	1320	0.93	27	0.1	0.852	4900	8400	550	0.33	27	0.2	0.568	2380	4080	251	0.11
27	0	1.13	13020	22320	1480	0.92	27	0.1	0.852	5880	10080	650	0.39	27	0.2	0.568	2800	4080	320	0.12
27	0	1.42	560	960	60	0.09	27	0.1	0.852	8120	13920	900	0.49	27	0.2	0.568	3360	5760	380	0.14
27	0	1.42	980	1680	112	0.12	27	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.54	27	0.2	0.568	3920	6720	440	0.15
27	0	1.42	1400	2400	160	0.18	27	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.55	27	0.2	0.568	4900	8400	550	0.18
27	0	1.42	1960	3360	215	0.25	27	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.58	27	0.2	0.568	5880	10080	650	0.21
27	0	1.42	2380	4080	251	0.29	27	0.1	1.13	560	960	60	0.06	27	0.2	0.568	8120	13920	900	0.27
27	0	1.42	2800	4080	320	0.34	27	0.1	1.13	980	1680	112	0.09	27	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.33
27	0	1.42	3360	5760	380	0.41	27	0.1	1.13	1400	2400	160	0.12	27	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.36
27	0	1.42	3920	6720	440	0.47	27	0.1	1.13	1960	3360	215	0.17	27	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.37
27	0	1.42	4900	8400	550	0.58	27	0.1	1.13	2380	4080	251	0.20	27	0.2	0.852	560	960	60	0.04
27	0	1.42	5880	10080	650	0.69	27	0.1	1.13	2800	4080	320	0.21	27	0.2	0.852	980	1680	112	0.06
27	0	1.42	8120	13920	900	0.86	27	0.1	1.13	3360	5760	380	0.25	27	0.2	0.852	1400	2400	160	0.07
27	0	1.42	10500	18000	1200	0.93	27	0.1	1.13	3920	6720	440	0.28	27	0.2	0.852	1960	3360	215	0.11
27	0	1.42	11620	19920	1320	0.93	27	0.1	1.13	4900	8400	550	0.34	27	0.2	0.852	2380	4080	251	0.11
27	0	1.42	13020	22320	1480	0.92	27	0.1	1.13	5880	10080	650	0.39	27	0.2	0.852	2800	4080	320	0.14
27	0.1	0.001	560	960	60	0.04	27	0.1	1.13	8120	13920	900	0.49	27	0.2	0.852	3360	5760	380	0.14
27	0.1	0.001	980	1680	112	0.06	27	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.54	27	0.2	0.852	3920	6720	440	0.16
27	0.1	0.001	1400	2400	160	0.09	27	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.56	27	0.2	0.852	4900	8400	550	0.19
27	0.1	0.001	1960	3360	215	0.13	27	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.58	27	0.2	0.852	5880	10080	650	0.23
27	0.1	0.001	2380	4080	251	0.16	27	0.1	1.42	560	960	60	0.06	27	0.2	0.852	8120	13920	900	0.29
27	0.1	0.001	2800	4080	320	0.17	27	0.1	1.42	980	1680	112	0.08	27	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.35
27	0.1	0.001	3360	5760	380	0.21	27	0.1	1.42	1400	2400	160	0.13	27	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.36
27	0.1	0.001	3920	6720	440	0.24	27	0.1	1.42	1960	3360	215	0.17	27	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.38
27	0.1	0.001	4900	8400	550	0.31	27	0.1	1.42	2380	4080	251	0.20	27	0.2	1.13	560	960	60	0.04
27	0.1	0.001	5880	10080	650	0.37	27	0.1	1.42	2800	4080	320	0.23	27	0.2	1.13	980	1680	112	0.07
27	0.1	0.001	8120	13920	900	0.46	27	0.1	1.42	3360	5760	380	0.26	27	0.2	1.13	1400	2400	160	0.09
27	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.53	27	0.1	1.42	3920	6720	440	0.29	27	0.2	1.13	1960	3360	215	0.12
27	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.55	27	0.1	1.42	4900	8400	550	0.35	27	0.2	1.13	2380	4080	251	0.14
27	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.57	27	0.1	1.42	5880	10080	650	0.41	27	0.2	1.13	2800	4080	320	0.15
27	0.1	0.284	560	960	60	0.04	27	0.1	1.42	8120	13920	900	0.49	27	0.2	1.13	3360	5760	380	0.16
27	0.1	0.284	980	1680	112	0.07	27	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.55	27	0.2	1.13	3920	6720	440	0.18
27	0.1	0.284	1400	2400	160	0.10	27	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.56	27	0.2	1.13	4900	8400	550	0.22
27	0.1	0.284	1960	3360	215	0.14	27	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.58	27	0.2	1.13	5880	10080	650	0.25
27	0.1	0.284	2380	4080	251	0.16	27	0.2	0.001	560	960	60	0.02	27	0.2	1.13	8120	13920	900	0.31
27	0.1	0.284	2800	4080	320	0.19	27	0.2	0.001	980	1680	112	0.03	27	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.36
27	0.1	0.284	3360	5760	380	0.22	27	0.2	0.001	1400	2400	160	0.04	27	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.37
27	0.1	0.284	3920	6720	440	0.25	27	0.2	0.001	1960	3360	215	0.05	27	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.39
27	0.1	0.284	4900	8400	550	0.33	27	0.2	0.001	2380	4080	251	0.08	27	0.2	1.42	560	960	60	0.05
27	0.1	0.284	5880	10080	650	0.39	27	0.2	0.001	2800	4080	320	0.08	27	0.2	1.42	980	1680	112	0.07
27	0.1	0.284	8120	13920	900	0.47	27	0.2	0.001	3360	5760	380	0.10	27	0.2	1.42	1400	2400	160	0.10
27	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.54	27	0.2	0.001	3920	6720	440	0.11	27	0.2	1.42	1960	3360	215	0.12
27	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.55	27	0.2	0.001	4900	8400	550	0.14	27	0.2	1.42	2380	4080	251	0.13
27	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.57	27	0.2	0.001	5880	10080	650	0.17	27	0.2	1.42	2800	4080	320	0.16
27	0.1	0.568	560	960	60	0.05	27	0.2	0.001	8120	13920	900	0.23	27	0.2	1.42	3360	5760	380	0.17
27	0.1	0.568	980	1680	112	0.08	27	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.30	27	0.2	1.42	3920	6720	440	0.21
27	0.1	0.568	1400	2400	160	0.11	27	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.31	27	0.2	1.42	4900	8400	550	0.24
27	0.1	0.568	1960	3360	215	0.14	27	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.33	27	0.2	1.42	5880	10080	650	0.25
27	0.1	0.568	2380	4080	251	0.17	27	0.2	0.284	560	960	60	0.03	27	0.2	1.42	8120	13920	900	0.32
27	0.1	0.568	2800	4080	320	0.20	27	0.2	0.284	980	1680	112	0.05	27	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.37
27	0.1	0.568	3360	5760	380	0.23	27	0.2	0.284	1400	2400	160	0.06	27	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.38
27	0.1	0.568	3920	6720	440	0.27	27	0.2	0.284	1960	3360	215	0.08	27	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.39
27	0.1	0.568	4900	8400	550	0.32	27	0.2	0.284	2380	4080	251	0.10	27	0.3	0.001	560	960	60	0.01
27	0.1	0.568	5880	10080	650	0.38	27	0.2	0.284	2800	4080	320	0.11	27	0.3	0.001	980	1680	112	0.01
27	0.1	0.568	8120	13920	900	0.48	27	0.2	0.284	3360	5760	380	0.12	27	0.3	0.001	1400	2400	160	0.01
27	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.54	27	0.2	0.284	3920	6720	440	0.13	27	0.3	0.001	1960	3360	215	0.02
27	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.55	27	0.2	0.284	4900	8400	550	0.16	27	0.3	0.001	2380	4080	251	0.03
27	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.58	27	0.2	0.284	5880	10080	650	0.19	27	0.3	0.001	2800	4080	320	0.03
27	0.1	0.852	560	960	60	0.05	27	0.2	0.284	8120	13920	900	0.26	27	0.3	0.001	3360	5760	380	0.03
27	0.1	0.852	980	1680	112	0.09	27	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.31	27	0.3	0.001	3920	6720	440	0.04

27	0.3	0.001	4900	8400	550	0.04	27	0.3	1.42	2380	4080	251	0.11	30	0	1.13	560	960	60	0.08
27	0.3	0.001	5880	10080	650	0.05	27	0.3	1.42	2800	4080	320	0.12	30	0	1.13	980	1680	112	0.11
27	0.3	0.001	8120	13920	900	0.07	27	0.3	1.42	3360	5760	380	0.13	30	0	1.13	1400	2400	160	0.14
27	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.09	27	0.3	1.42	3920	6720	440	0.14	30	0	1.13	1960	3360	215	0.20
27	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.12	27	0.3	1.42	4900	8400	550	0.15	30	0	1.13	2380	4080	251	0.25
27	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.12	27	0.3	1.42	5880	10080	650	0.17	30	0	1.13	2800	4800	320	0.29
27	0.3	0.284	560	960	60	0.02	27	0.3	1.42	8120	13920	900	0.21	30	0	1.13	3360	5760	380	0.34
27	0.3	0.284	980	1680	112	0.03	27	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.23	30	0	1.13	3920	6720	440	0.39
27	0.3	0.284	1400	2400	160	0.04	27	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.23	30	0	1.13	4900	8400	550	0.48
27	0.3	0.284	1960	3360	215	0.05	27	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.24	30	0	1.13	5880	10080	650	0.57
27	0.3	0.284	2380	4080	251	0.05	30	0	0.001	560	960	60	0.05	30	0	1.13	8120	13920	900	0.76
27	0.3	0.284	2800	4080	320	0.06	30	0	0.001	980	1680	112	0.10	30	0	1.13	10500	18000	1200	0.88
27	0.3	0.284	3360	5760	380	0.07	30	0	0.001	1400	2400	160	0.14	30	0	1.13	11620	19920	1320	0.90
27	0.3	0.284	3920	6720	440	0.07	30	0	0.001	1960	3360	215	0.21	30	0	1.13	13020	22320	1480	0.90
27	0.3	0.284	4900	8400	550	0.08	30	0	0.001	2380	4080	251	0.24	30	0	1.42	560	960	60	0.09
27	0.3	0.284	5880	10080	650	0.10	30	0	0.001	2800	4800	320	0.27	30	0	1.42	980	1680	112	0.11
27	0.3	0.284	8120	13920	900	0.12	30	0	0.001	3360	5760	380	0.33	30	0	1.42	1400	2400	160	0.14
27	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.15	30	0	0.001	3920	6720	440	0.39	30	0	1.42	1960	3360	215	0.20
27	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.15	30	0	0.001	4900	8400	550	0.48	30	0	1.42	2380	4080	251	0.25
27	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.17	30	0	0.001	5880	10080	650	0.57	30	0	1.42	2800	4800	320	0.28
27	0.3	0.568	560	960	60	0.03	30	0	0.001	8120	13920	900	0.76	30	0	1.42	3360	5760	380	0.34
27	0.3	0.568	980	1680	112	0.04	30	0	0.001	10500	18000	1200	0.88	30	0	1.42	3920	6720	440	0.39
27	0.3	0.568	1400	2400	160	0.05	30	0	0.001	11620	19920	1320	0.90	30	0	1.42	4900	8400	550	0.48
27	0.3	0.568	1960	3360	215	0.07	30	0	0.001	13020	22320	1480	0.91	30	0	1.42	5880	10080	650	0.57
27	0.3	0.568	2380	4080	251	0.07	30	0	0.284	560	960	60	0.06	30	0	1.42	8120	13920	900	0.76
27	0.3	0.568	2800	4080	320	0.07	30	0	0.284	980	1680	112	0.10	30	0	1.42	10500	18000	1200	0.88
27	0.3	0.568	3360	5760	380	0.08	30	0	0.284	1400	2400	160	0.14	30	0	1.42	11620	19920	1320	0.90
27	0.3	0.568	3920	6720	440	0.09	30	0	0.284	1960	3360	215	0.20	30	0	1.42	13020	22320	1480	0.90
27	0.3	0.568	4900	8400	550	0.10	30	0	0.284	2380	4080	251	0.24	30	0.1	0.001	560	960	60	0.03
27	0.3	0.568	5880	10080	650	0.12	30	0	0.284	2800	4800	320	0.28	30	0.1	0.001	980	1680	112	0.06
27	0.3	0.568	8120	13920	900	0.15	30	0	0.284	3360	5760	380	0.34	30	0.1	0.001	1400	2400	160	0.08
27	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.18	30	0	0.284	3920	6720	440	0.39	30	0.1	0.001	1960	3360	215	0.10
27	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.19	30	0	0.284	4900	8400	550	0.48	30	0.1	0.001	2380	4080	251	0.13
27	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.21	30	0	0.284	5880	10080	650	0.57	30	0.1	0.001	2800	4800	320	0.15
27	0.3	0.852	560	960	60	0.03	30	0	0.284	8120	13920	900	0.76	30	0.1	0.001	3360	5760	380	0.18
27	0.3	0.852	980	1680	112	0.04	30	0	0.284	10500	18000	1200	0.88	30	0.1	0.001	3920	6720	440	0.21
27	0.3	0.852	1400	2400	160	0.06	30	0	0.284	11620	19920	1320	0.90	30	0.1	0.001	4900	8400	550	0.27
27	0.3	0.852	1960	3360	215	0.07	30	0	0.284	13020	22320	1480	0.90	30	0.1	0.001	5880	10080	650	0.31
27	0.3	0.852	2380	4080	251	0.08	30	0	0.568	560	960	60	0.06	30	0.1	0.001	8120	13920	900	0.41
27	0.3	0.852	2800	4080	320	0.09	30	0	0.568	980	1680	112	0.11	30	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.49
27	0.3	0.852	3360	5760	380	0.10	30	0	0.568	1400	2400	160	0.14	30	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.52
27	0.3	0.852	3920	6720	440	0.10	30	0	0.568	1960	3360	215	0.20	30	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.54
27	0.3	0.852	4900	8400	550	0.11	30	0	0.568	2380	4080	251	0.24	30	0.1	0.284	560	960	60	0.04
27	0.3	0.852	5880	10080	650	0.13	30	0	0.568	2800	4800	320	0.28	30	0.1	0.284	980	1680	112	0.07
27	0.3	0.852	8120	13920	900	0.16	30	0	0.568	3360	5760	380	0.34	30	0.1	0.284	1400	2400	160	0.09
27	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.20	30	0	0.568	3920	6720	440	0.39	30	0.1	0.284	1960	3360	215	0.12
27	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.20	30	0	0.568	4900	8400	550	0.48	30	0.1	0.284	2380	4080	251	0.14
27	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.22	30	0	0.568	5880	10080	650	0.57	30	0.1	0.284	2800	4800	320	0.16
27	0.3	1.13	560	960	60	0.03	30	0	0.568	8120	13920	900	0.76	30	0.1	0.284	3360	5760	380	0.19
27	0.3	1.13	980	1680	112	0.04	30	0	0.568	10500	18000	1200	0.88	30	0.1	0.284	3920	6720	440	0.23
27	0.3	1.13	1400	2400	160	0.08	30	0	0.568	11620	19920	1320	0.90	30	0.1	0.284	4900	8400	550	0.28
27	0.3	1.13	1960	3360	215	0.09	30	0	0.568	13020	22320	1480	0.90	30	0.1	0.284	5880	10080	650	0.32
27	0.3	1.13	2380	4080	251	0.09	30	0	0.852	560	960	60	0.09	30	0.1	0.284	8120	13920	900	0.42
27	0.3	1.13	2800	4080	320	0.10	30	0	0.852	980	1680	112	0.11	30	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.50
27	0.3	1.13	3360	5760	380	0.11	30	0	0.852	1400	2400	160	0.14	30	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.52
27	0.3	1.13	3920	6720	440	0.12	30	0	0.852	1960	3360	215	0.20	30	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.54
27	0.3	1.13	4900	8400	550	0.15	30	0	0.852	2380	4080	251	0.24	30	0.1	0.568	560	960	60	0.04
27	0.3	1.13	5880	10080	650	0.16	30	0	0.852	2800	4800	320	0.28	30	0.1	0.568	980	1680	112	0.08
27	0.3	1.13	8120	13920	900	0.19	30	0	0.852	3360	5760	380	0.34	30	0.1	0.568	1400	2400	160	0.09
27	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.22	30	0	0.852	3920	6720	440	0.39	30	0.1	0.568	1960	3360	215	0.12
27	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.22	30	0	0.852	4900	8400	550	0.48	30	0.1	0.568	2380	4080	251	0.15
27	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.23	30	0	0.852	5880	10080	650	0.57	30	0.1	0.568	2800	4800	320	0.17
27	0.3	1.42	560	960	60	0.03	30	0	0.852	8120	13920	900	0.76	30	0.1	0.568	3360	5760	380	0.20
27	0.3	1.42	980	1680	112	0.04	30	0	0.852	10500	18000	1200	0.88	30	0.1	0.568	3920	6720	440	0.23
27	0.3	1.42	1400	2400	160	0.08	30	0	0.852	11620	19920	1320	0.90	30	0.1	0.568	4900	8400	550	0.28
27	0.3	1.42	1960	3360	215	0.10	30	0	0.852	13020	22320	1480	0.90	30	0.1	0.568	5880	10080	650	0.33

30	0.1	0.568	8120	13920	900	0.43	30	0.2	0.284	3360	5760	380	0.10	30	0.3	0.001	1400	2400	160	0.01
30	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.50	30	0.2	0.284	3920	6720	440	0.12	30	0.3	0.001	1960	3360	215	0.02
30	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.52	30	0.2	0.284	4900	8400	550	0.14	30	0.3	0.001	2380	4080	251	0.02
30	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.54	30	0.2	0.284	5880	10080	650	0.16	30	0.3	0.001	2800	4800	320	0.02
30	0.1	0.852	560	960	60	0.05	30	0.2	0.284	8120	13920	900	0.21	30	0.3	0.001	3360	5760	380	0.03
30	0.1	0.852	980	1680	112	0.07	30	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.27	30	0.3	0.001	3920	6720	440	0.03
30	0.1	0.852	1400	2400	160	0.11	30	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.29	30	0.3	0.001	4900	8400	550	0.04
30	0.1	0.852	1960	3360	215	0.13	30	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.32	30	0.3	0.001	5880	10080	650	0.05
30	0.1	0.852	2380	4080	251	0.15	30	0.2	0.568	560	960	60	0.04	30	0.3	0.001	8120	13920	900	0.06
30	0.1	0.852	2800	4800	320	0.18	30	0.2	0.568	980	1680	112	0.05	30	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.09
30	0.1	0.852	3360	5760	380	0.21	30	0.2	0.568	1400	2400	160	0.06	30	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.10
30	0.1	0.852	3920	6720	440	0.24	30	0.2	0.568	1960	3360	215	0.08	30	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.10
30	0.1	0.852	4900	8400	550	0.29	30	0.2	0.568	2380	4080	251	0.09	30	0.3	0.284	560	960	60	0.02
30	0.1	0.852	5880	10080	650	0.34	30	0.2	0.568	2800	4800	320	0.10	30	0.3	0.284	980	1680	112	0.03
30	0.1	0.852	8120	13920	900	0.44	30	0.2	0.568	3360	5760	380	0.12	30	0.3	0.284	1400	2400	160	0.04
30	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.50	30	0.2	0.568	3920	6720	440	0.13	30	0.3	0.284	1960	3360	215	0.04
30	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.52	30	0.2	0.568	4900	8400	550	0.16	30	0.3	0.284	2380	4080	251	0.05
30	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.54	30	0.2	0.568	5880	10080	650	0.18	30	0.3	0.284	2800	4800	320	0.05
30	0.1	1.13	560	960	60	0.05	30	0.2	0.568	8120	13920	900	0.23	30	0.3	0.284	3360	5760	380	0.06
30	0.1	1.13	980	1680	112	0.08	30	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.29	30	0.3	0.284	3920	6720	440	0.06
30	0.1	1.13	1400	2400	160	0.11	30	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.31	30	0.3	0.284	4900	8400	550	0.08
30	0.1	1.13	1960	3360	215	0.14	30	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.33	30	0.3	0.284	5880	10080	650	0.08
30	0.1	1.13	2380	4080	251	0.16	30	0.2	0.852	560	960	60	0.04	30	0.3	0.284	8120	13920	900	0.11
30	0.1	1.13	2800	4800	320	0.19	30	0.2	0.852	980	1680	112	0.06	30	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.13
30	0.1	1.13	3360	5760	380	0.21	30	0.2	0.852	1400	2400	160	0.07	30	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.14
30	0.1	1.13	3920	6720	440	0.25	30	0.2	0.852	1960	3360	215	0.09	30	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.15
30	0.1	1.13	4900	8400	550	0.30	30	0.2	0.852	2380	4080	251	0.10	30	0.3	0.568	560	960	60	0.03
30	0.1	1.13	5880	10080	650	0.34	30	0.2	0.852	2800	4800	320	0.11	30	0.3	0.568	980	1680	112	0.04
30	0.1	1.13	8120	13920	900	0.44	30	0.2	0.852	3360	5760	380	0.13	30	0.3	0.568	1400	2400	160	0.04
30	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.50	30	0.2	0.852	3920	6720	440	0.14	30	0.3	0.568	1960	3360	215	0.05
30	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.53	30	0.2	0.852	4900	8400	550	0.17	30	0.3	0.568	2380	4080	251	0.06
30	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.55	30	0.2	0.852	5880	10080	650	0.19	30	0.3	0.568	2800	4800	320	0.06
30	0.1	1.42	560	960	60	0.06	30	0.2	0.852	8120	13920	900	0.25	30	0.3	0.568	3360	5760	380	0.07
30	0.1	1.42	980	1680	112	0.08	30	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.30	30	0.3	0.568	3920	6720	440	0.08
30	0.1	1.42	1400	2400	160	0.11	30	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.33	30	0.3	0.568	4900	8400	550	0.09
30	0.1	1.42	1960	3360	215	0.15	30	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.35	30	0.3	0.568	5880	10080	650	0.10
30	0.1	1.42	2380	4080	251	0.16	30	0.2	1.13	560	960	60	0.04	30	0.3	0.568	8120	13920	900	0.13
30	0.1	1.42	2800	4800	320	0.18	30	0.2	1.13	980	1680	112	0.06	30	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.15
30	0.1	1.42	3360	5760	380	0.22	30	0.2	1.13	1400	2400	160	0.08	30	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.16
30	0.1	1.42	3920	6720	440	0.25	30	0.2	1.13	1960	3360	215	0.09	30	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.18
30	0.1	1.42	4900	8400	550	0.30	30	0.2	1.13	2380	4080	251	0.11	30	0.3	0.852	560	960	60	0.03
30	0.1	1.42	5880	10080	650	0.36	30	0.2	1.13	2800	4800	320	0.12	30	0.3	0.852	980	1680	112	0.04
30	0.1	1.42	8120	13920	900	0.44	30	0.2	1.13	3360	5760	380	0.13	30	0.3	0.852	1400	2400	160	0.05
30	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.51	30	0.2	1.13	3920	6720	440	0.15	30	0.3	0.852	1960	3360	215	0.06
30	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.53	30	0.2	1.13	4900	8400	550	0.18	30	0.3	0.852	2380	4080	251	0.07
30	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.55	30	0.2	1.13	5880	10080	650	0.20	30	0.3	0.852	2800	4800	320	0.07
30	0.2	0.001	560	960	60	0.02	30	0.2	1.13	8120	13920	900	0.26	30	0.3	0.852	3360	5760	380	0.08
30	0.2	0.001	980	1680	112	0.02	30	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.31	30	0.3	0.852	3920	6720	440	0.09
30	0.2	0.001	1400	2400	160	0.03	30	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.34	30	0.3	0.852	4900	8400	550	0.11
30	0.2	0.001	1960	3360	215	0.05	30	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.36	30	0.3	0.852	5880	10080	650	0.12
30	0.2	0.001	2380	4080	251	0.06	30	0.2	1.42	560	960	60	0.05	30	0.3	0.852	8120	13920	900	0.15
30	0.2	0.001	2800	4800	320	0.07	30	0.2	1.42	980	1680	112	0.06	30	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.17
30	0.2	0.001	3360	5760	380	0.08	30	0.2	1.42	1400	2400	160	0.08	30	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.18
30	0.2	0.001	3920	6720	440	0.09	30	0.2	1.42	1960	3360	215	0.10	30	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.20
30	0.2	0.001	4900	8400	550	0.11	30	0.2	1.42	2380	4080	251	0.11	30	0.3	1.13	560	960	60	0.03
30	0.2	0.001	5880	10080	650	0.14	30	0.2	1.42	2800	4800	320	0.13	30	0.3	1.13	980	1680	112	0.04
30	0.2	0.001	8120	13920	900	0.19	30	0.2	1.42	3360	5760	380	0.15	30	0.3	1.13	1400	2400	160	0.06
30	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.24	30	0.2	1.42	3920	6720	440	0.16	30	0.3	1.13	1960	3360	215	0.07
30	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.26	30	0.2	1.42	4900	8400	550	0.19	30	0.3	1.13	2380	4080	251	0.07
30	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.29	30	0.2	1.42	5880	10080	650	0.21	30	0.3	1.13	2800	4800	320	0.08
30	0.2	0.284	560	960	60	0.03	30	0.2	1.42	8120	13920	900	0.27	30	0.3	1.13	3360	5760	380	0.09
30	0.2	0.284	980	1680	112	0.04	30	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.32	30	0.3	1.13	3920	6720	440	0.10
30	0.2	0.284	1400	2400	160	0.05	30	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.35	30	0.3	1.13	4900	8400	550	0.11
30	0.2	0.284	1960	3360	215	0.07	30	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.37	30	0.3	1.13	5880	10080	650	0.13
30	0.2	0.284	2380	4080	251	0.08	30	0.3	0.001	560	960	60	0.00	30	0.3	1.13	8120	13920	900	0.16
30	0.2	0.284	2800	4800	320	0.09	30	0.3	0.001	980	1680	112	0.01	30	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.19

30	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.20	33	0	0.852	4900	8400	550	0.41	33	0.1	0.568	2380	4080	251	0.12
30	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.21	33	0	0.852	5880	10080	650	0.48	33	0.1	0.568	2800	4800	320	0.14
30	0.3	1.42	560	960	60	0.03	33	0	0.852	8120	13920	900	0.65	33	0.1	0.568	3360	5760	380	0.17
30	0.3	1.42	980	1680	112	0.04	33	0	0.852	10500	18000	1200	0.79	33	0.1	0.568	3920	6720	440	0.19
30	0.3	1.42	1400	2400	160	0.06	33	0	0.852	11620	19920	1320	0.83	33	0.1	0.568	4900	8400	550	0.23
30	0.3	1.42	1960	3360	215	0.08	33	0	0.852	13020	22320	1480	0.88	33	0.1	0.568	5880	10080	650	0.27
30	0.3	1.42	2380	4080	251	0.08	33	0	1.13	560	960	60	0.06	33	0.1	0.568	8120	13920	900	0.36
30	0.3	1.42	2800	4800	320	0.09	33	0	1.13	980	1680	112	0.10	33	0.1	0.568	10500	18000	1200	0.44
30	0.3	1.42	3360	5760	380	0.10	33	0	1.13	1400	2400	160	0.12	33	0.1	0.568	11620	19920	1320	0.47
30	0.3	1.42	3920	6720	440	0.11	33	0	1.13	1960	3360	215	0.17	33	0.1	0.568	13020	22320	1480	0.50
30	0.3	1.42	4900	8400	550	0.12	33	0	1.13	2380	4080	251	0.20	33	0.1	0.852	560	960	60	0.04
30	0.3	1.42	5880	10080	650	0.14	33	0	1.13	2800	4800	320	0.24	33	0.1	0.852	980	1680	112	0.06
30	0.3	1.42	8120	13920	900	0.17	33	0	1.13	3360	5760	380	0.28	33	0.1	0.852	1400	2400	160	0.08
30	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.20	33	0	1.13	3920	6720	440	0.32	33	0.1	0.852	1960	3360	215	0.11
30	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.21	33	0	1.13	4900	8400	550	0.41	33	0.1	0.852	2380	4080	251	0.13
30	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.22	33	0	1.13	5880	10080	650	0.48	33	0.1	0.852	2800	4800	320	0.15
33	0	0.001	560	960	60	0.05	33	0	1.13	8120	13920	900	0.65	33	0.1	0.852	3360	5760	380	0.18
33	0	0.001	980	1680	112	0.08	33	0	1.13	10500	18000	1200	0.79	33	0.1	0.852	3920	6720	440	0.20
33	0	0.001	1400	2400	160	0.12	33	0	1.13	11620	19920	1320	0.83	33	0.1	0.852	4900	8400	550	0.24
33	0	0.001	1960	3360	215	0.16	33	0	1.13	13020	22320	1480	0.88	33	0.1	0.852	5880	10080	650	0.28
33	0	0.001	2380	4080	251	0.20	33	0	1.42	560	960	60	0.06	33	0.1	0.852	8120	13920	900	0.37
33	0	0.001	2800	4800	320	0.23	33	0	1.42	980	1680	112	0.09	33	0.1	0.852	10500	18000	1200	0.45
33	0	0.001	3360	5760	380	0.28	33	0	1.42	1400	2400	160	0.12	33	0.1	0.852	11620	19920	1320	0.48
33	0	0.001	3920	6720	440	0.32	33	0	1.42	1960	3360	215	0.17	33	0.1	0.852	13020	22320	1480	0.50
33	0	0.001	4900	8400	550	0.40	33	0	1.42	2380	4080	251	0.20	33	0.1	1.13	560	960	60	0.04
33	0	0.001	5880	10080	650	0.48	33	0	1.42	2800	4800	320	0.24	33	0.1	1.13	980	1680	112	0.07
33	0	0.001	8120	13920	900	0.65	33	0	1.42	3360	5760	380	0.28	33	0.1	1.13	1400	2400	160	0.10
33	0	0.001	10500	18000	1200	0.79	33	0	1.42	3920	6720	440	0.33	33	0.1	1.13	1960	3360	215	0.12
33	0	0.001	11620	19920	1320	0.83	33	0	1.42	4900	8400	550	0.41	33	0.1	1.13	2380	4080	251	0.13
33	0	0.001	13020	22320	1480	0.88	33	0	1.42	5880	10080	650	0.48	33	0.1	1.13	2800	4800	320	0.15
33	0	0.284	560	960	60	0.05	33	0	1.42	8120	13920	900	0.65	33	0.1	1.13	3360	5760	380	0.18
33	0	0.284	980	1680	112	0.08	33	0	1.42	10500	18000	1200	0.79	33	0.1	1.13	3920	6720	440	0.20
33	0	0.284	1400	2400	160	0.13	33	0	1.42	11620	19920	1320	0.83	33	0.1	1.13	4900	8400	550	0.25
33	0	0.284	1960	3360	215	0.16	33	0	1.42	13020	22320	1480	0.88	33	0.1	1.13	5880	10080	650	0.29
33	0	0.284	2380	4080	251	0.23	33	0.1	0.001	560	960	60	0.03	33	0.1	1.13	8120	13920	900	0.38
33	0	0.284	2800	4800	320	0.23	33	0.1	0.001	980	1680	112	0.04	33	0.1	1.13	10500	18000	1200	0.45
33	0	0.284	3360	5760	380	0.28	33	0.1	0.001	1400	2400	160	0.06	33	0.1	1.13	11620	19920	1320	0.48
33	0	0.284	3920	6720	440	0.32	33	0.1	0.001	1960	3360	215	0.08	33	0.1	1.13	13020	22320	1480	0.50
33	0	0.284	4900	8400	550	0.40	33	0.1	0.001	2380	4080	251	0.10	33	0.1	1.42	560	960	60	0.05
33	0	0.284	5880	10080	650	0.48	33	0.1	0.001	2800	4800	320	0.12	33	0.1	1.42	980	1680	112	0.07
33	0	0.284	8120	13920	900	0.65	33	0.1	0.001	3360	5760	380	0.14	33	0.1	1.42	1400	2400	160	0.10
33	0	0.284	10500	18000	1200	0.79	33	0.1	0.001	3920	6720	440	0.17	33	0.1	1.42	1960	3360	215	0.12
33	0	0.284	11620	19920	1320	0.83	33	0.1	0.001	4900	8400	550	0.21	33	0.1	1.42	2380	4080	251	0.13
33	0	0.284	13020	22320	1480	0.88	33	0.1	0.001	5880	10080	650	0.25	33	0.1	1.42	2800	4800	320	0.17
33	0	0.568	560	960	60	0.05	33	0.1	0.001	8120	13920	900	0.34	33	0.1	1.42	3360	5760	380	0.18
33	0	0.568	980	1680	112	0.09	33	0.1	0.001	10500	18000	1200	0.43	33	0.1	1.42	3920	6720	440	0.21
33	0	0.568	1400	2400	160	0.12	33	0.1	0.001	11620	19920	1320	0.46	33	0.1	1.42	4900	8400	550	0.25
33	0	0.568	1960	3360	215	0.16	33	0.1	0.001	13020	22320	1480	0.49	33	0.1	1.42	5880	10080	650	0.29
33	0	0.568	2380	4080	251	0.20	33	0.1	0.284	560	960	60	0.04	33	0.1	1.42	8120	13920	900	0.38
33	0	0.568	2800	4800	320	0.23	33	0.1	0.284	980	1680	112	0.06	33	0.1	1.42	10500	18000	1200	0.46
33	0	0.568	3360	5760	380	0.29	33	0.1	0.284	1400	2400	160	0.07	33	0.1	1.42	11620	19920	1320	0.48
33	0	0.568	3920	6720	440	0.32	33	0.1	0.284	1960	3360	215	0.10	33	0.1	1.42	13020	22320	1480	0.50
33	0	0.568	4900	8400	550	0.40	33	0.1	0.284	2380	4080	251	0.11	33	0.2	0.001	560	960	60	0.01
33	0	0.568	5880	10080	650	0.48	33	0.1	0.284	2800	4800	320	0.13	33	0.2	0.001	980	1680	112	0.02
33	0	0.568	8120	13920	900	0.65	33	0.1	0.284	3360	5760	380	0.16	33	0.2	0.001	1400	2400	160	0.03
33	0	0.568	10500	18000	1200	0.79	33	0.1	0.284	3920	6720	440	0.18	33	0.2	0.001	1960	3360	215	0.04
33	0	0.568	11620	19920	1320	0.83	33	0.1	0.284	4900	8400	550	0.22	33	0.2	0.001	2380	4080	251	0.04
33	0	0.568	13020	22320	1480	0.88	33	0.1	0.284	5880	10080	650	0.27	33	0.2	0.001	2800	4800	320	0.06
33	0	0.852	560	960	60	0.06	33	0.1	0.284	8120	13920	900	0.35	33	0.2	0.001	3360	5760	380	0.06
33	0	0.852	980	1680	112	0.08	33	0.1	0.284	10500	18000	1200	0.44	33	0.2	0.001	3920	6720	440	0.07
33	0	0.852	1400	2400	160	0.12	33	0.1	0.284	11620	19920	1320	0.47	33	0.2	0.001	4900	8400	550	0.09
33	0	0.852	1960	3360	215	0.16	33	0.1	0.284	13020	22320	1480	0.50	33	0.2	0.001	5880	10080	650	0.11
33	0	0.852	2380	4080	251	0.20	33	0.1	0.568	560	960	60	0.04	33	0.2	0.001	8120	13920	900	0.15
33	0	0.852	2800	4800	320	0.24	33	0.1	0.568	980	1680	112	0.07	33	0.2	0.001	10500	18000	1200	0.19
33	0	0.852	3360	5760	380	0.28	33	0.1	0.568	1400	2400	160	0.08	33	0.2	0.001	11620	19920	1320	0.21
33	0	0.852	3920	6720	440	0.32	33	0.1	0.568	1960	3360	215	0.10	33	0.2	0.001	13020	22320	1480	0.24

33	0.2	0.284	560	960	60	0.03	33	0.2	1.42	8120	13920	900	0.23	33	0.3	1.13	3360	5760	380	0.08
33	0.2	0.284	980	1680	112	0.04	33	0.2	1.42	10500	18000	1200	0.28	33	0.3	1.13	3920	6720	440	0.09
33	0.2	0.284	1400	2400	160	0.05	33	0.2	1.42	11620	19920	1320	0.30	33	0.3	1.13	4900	8400	550	0.10
33	0.2	0.284	1960	3360	215	0.06	33	0.2	1.42	13020	22320	1480	0.33	33	0.3	1.13	5880	10080	650	0.12
33	0.2	0.284	2380	4080	251	0.07	33	0.3	0.001	560	960	60	0.00	33	0.3	1.13	8120	13920	900	0.14
33	0.2	0.284	2800	4800	320	0.08	33	0.3	0.001	980	1680	112	0.01	33	0.3	1.13	10500	18000	1200	0.17
33	0.2	0.284	3360	5760	380	0.09	33	0.3	0.001	1400	2400	160	0.01	33	0.3	1.13	11620	19920	1320	0.18
33	0.2	0.284	3920	6720	440	0.10	33	0.3	0.001	1960	3360	215	0.01	33	0.3	1.13	13020	22320	1480	0.19
33	0.2	0.284	4900	8400	550	0.12	33	0.3	0.001	2380	4080	251	0.02	33	0.3	1.42	560	960	60	0.03
33	0.2	0.284	5880	10080	650	0.14	33	0.3	0.001	2800	4800	320	0.02	33	0.3	1.42	980	1680	112	0.04
33	0.2	0.284	8120	13920	900	0.18	33	0.3	0.001	3360	5760	380	0.02	33	0.3	1.42	1400	2400	160	0.06
33	0.2	0.284	10500	18000	1200	0.22	33	0.3	0.001	3920	6720	440	0.02	33	0.3	1.42	1960	3360	215	0.08
33	0.2	0.284	11620	19920	1320	0.24	33	0.3	0.001	4900	8400	550	0.03	33	0.3	1.42	2380	4080	251	0.07
33	0.2	0.284	13020	22320	1480	0.27	33	0.3	0.001	5880	10080	650	0.04	33	0.3	1.42	2800	4800	320	0.08
33	0.2	0.568	560	960	60	0.04	33	0.3	0.001	8120	13920	900	0.05	33	0.3	1.42	3360	5760	380	0.09
33	0.2	0.568	980	1680	112	0.04	33	0.3	0.001	10500	18000	1200	0.07	33	0.3	1.42	3920	6720	440	0.10
33	0.2	0.568	1400	2400	160	0.06	33	0.3	0.001	11620	19920	1320	0.07	33	0.3	1.42	4900	8400	550	0.11
33	0.2	0.568	1960	3360	215	0.07	33	0.3	0.001	13020	22320	1480	0.08	33	0.3	1.42	5880	10080	650	0.12
33	0.2	0.568	2380	4080	251	0.08	33	0.3	0.284	560	960	60	0.02	33	0.3	1.42	8120	13920	900	0.15
33	0.2	0.568	2800	4800	320	0.09	33	0.3	0.284	980	1680	112	0.03	33	0.3	1.42	10500	18000	1200	0.18
33	0.2	0.568	3360	5760	380	0.10	33	0.3	0.284	1400	2400	160	0.03	33	0.3	1.42	11620	19920	1320	0.19
33	0.2	0.568	3920	6720	440	0.11	33	0.3	0.284	1960	3360	215	0.04	33	0.3	1.42	13020	22320	1480	0.20
33	0.2	0.568	4900	8400	550	0.13	33	0.3	0.284	2380	4080	251	0.04	33	0.3	0.284	2800	4800	320	0.05
33	0.2	0.568	5880	10080	650	0.15	33	0.3	0.284	2800	4800	320	0.05	33	0.3	0.284	3360	5760	380	0.05
33	0.2	0.568	8120	13920	900	0.20	33	0.3	0.284	3360	5760	380	0.05	33	0.3	0.284	3920	6720	440	0.06
33	0.2	0.568	10500	18000	1200	0.24	33	0.3	0.284	3920	6720	440	0.06	33	0.3	0.284	4900	8400	550	0.07
33	0.2	0.568	11620	19920	1320	0.26	33	0.3	0.284	4900	8400	550	0.07	33	0.3	0.284	5880	10080	650	0.07
33	0.2	0.568	13020	22320	1480	0.29	33	0.3	0.284	5880	10080	650	0.07	33	0.3	0.284	8120	13920	900	0.09
33	0.2	0.852	560	960	60	0.03	33	0.3	0.284	8120	13920	900	0.09	33	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.11
33	0.2	0.852	980	1680	112	0.05	33	0.3	0.284	10500	18000	1200	0.11	33	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.12
33	0.2	0.852	1400	2400	160	0.07	33	0.3	0.284	11620	19920	1320	0.12	33	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.13
33	0.2	0.852	1960	3360	215	0.08	33	0.3	0.284	13020	22320	1480	0.13	33	0.3	0.568	560	960	60	0.02
33	0.2	0.852	2380	4080	251	0.09	33	0.3	0.568	560	960	60	0.02	33	0.3	0.568	980	1680	112	0.03
33	0.2	0.852	2800	4800	320	0.09	33	0.3	0.568	980	1680	112	0.03	33	0.3	0.568	1400	2400	160	0.04
33	0.2	0.852	3360	5760	380	0.11	33	0.3	0.568	1400	2400	160	0.04	33	0.3	0.568	1960	3360	215	0.05
33	0.2	0.852	3920	6720	440	0.12	33	0.3	0.568	1960	3360	215	0.05	33	0.3	0.568	2380	4080	251	0.05
33	0.2	0.852	4900	8400	550	0.14	33	0.3	0.568	2380	4080	251	0.05	33	0.3	0.568	2800	4800	320	0.06
33	0.2	0.852	5880	10080	650	0.17	33	0.3	0.568	2800	4800	320	0.06	33	0.3	0.568	3360	5760	380	0.06
33	0.2	0.852	8120	13920	900	0.21	33	0.3	0.568	3360	5760	380	0.06	33	0.3	0.568	3920	6720	440	0.07
33	0.2	0.852	10500	18000	1200	0.26	33	0.3	0.568	3920	6720	440	0.07	33	0.3	0.568	4900	8400	550	0.08
33	0.2	0.852	11620	19920	1320	0.28	33	0.3	0.568	4900	8400	550	0.08	33	0.3	0.568	5880	10080	650	0.10
33	0.2	0.852	13020	22320	1480	0.30	33	0.3	0.568	5880	10080	650	0.10	33	0.3	0.568	8120	13920	900	0.11
33	0.2	1.13	560	960	60	0.03	33	0.3	0.568	8120	13920	900	0.11	33	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.13
33	0.2	1.13	980	1680	112	0.05	33	0.3	0.568	10500	18000	1200	0.13	33	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.14
33	0.2	1.13	1400	2400	160	0.07	33	0.3	0.568	11620	19920	1320	0.14	33	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.16
33	0.2	1.13	1960	3360	215	0.08	33	0.3	0.568	13020	22320	1480	0.16	33	0.3	0.852	560	960	60	0.03
33	0.2	1.13	2380	4080	251	0.09	33	0.3	0.852	560	960	60	0.03	33	0.3	0.852	980	1680	112	0.04
33	0.2	1.13	2800	4800	320	0.10	33	0.3	0.852	980	1680	112	0.04	33	0.3	0.852	1400	2400	160	0.05
33	0.2	1.13	3360	5760	380	0.12	33	0.3	0.852	1400	2400	160	0.05	33	0.3	0.852	1960	3360	215	0.06
33	0.2	1.13	3920	6720	440	0.13	33	0.3	0.852	1960	3360	215	0.06	33	0.3	0.852	2380	4080	251	0.06
33	0.2	1.13	4900	8400	550	0.15	33	0.3	0.852	2380	4080	251	0.06	33	0.3	0.852	2800	4800	320	0.07
33	0.2	1.13	5880	10080	650	0.17	33	0.3	0.852	2800	4800	320	0.07	33	0.3	0.852	3360	5760	380	0.07
33	0.2	1.13	8120	13920	900	0.22	33	0.3	0.852	3360	5760	380	0.07	33	0.3	0.852	3920	6720	440	0.08
33	0.2	1.13	10500	18000	1200	0.27	33	0.3	0.852	3920	6720	440	0.08	33	0.3	0.852	4900	8400	550	0.09
33	0.2	1.13	11620	19920	1320	0.29	33	0.3	0.852	4900	8400	550	0.09	33	0.3	0.852	5880	10080	650	0.11
33	0.2	1.13	13020	22320	1480	0.32	33	0.3	0.852	5880	10080	650	0.11	33	0.3	0.852	8120	13920	900	0.13
33	0.2	1.42	560	960	60	0.04	33	0.3	0.852	8120	13920	900	0.13	33	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.15
33	0.2	1.42	980	1680	112	0.05	33	0.3	0.852	10500	18000	1200	0.15	33	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.16
33	0.2	1.42	1400	2400	160	0.07	33	0.3	0.852	11620	19920	1320	0.16	33	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.17
33	0.2	1.42	1960	3360	215	0.09	33	0.3	0.852	13020	22320	1480	0.17	33	0.3	1.13	560	960	60	0.02
33	0.2	1.42	2380	4080	251	0.10	33	0.3	1.13	560	960	60	0.02	33	0.3	1.13	980	1680	112	0.04
33	0.2	1.42	2800	4800	320	0.11	33	0.3	1.13	980	1680	112	0.04	33	0.3	1.13	1400	2400	160	0.06
33	0.2	1.42	3360	5760	380	0.13	33	0.3	1.13	1400	2400	160	0.06	33	0.3	1.13	1960	3360	215	0.06
33	0.2	1.42	3920	6720	440	0.14	33	0.3	1.13	1960	3360	215	0.06	33	0.3	1.13	2380	4080	251	0.07
33	0.2	1.42	4900	8400	550	0.16	33	0.3	1.13	2380	4080	251	0.07	33	0.3	1.13	2800	4800	320	0.07
33	0.2	1.42	5880	10080	650	0.18	33	0.3	1.13	2800	4800	320	0.07							

Apéndice B

Tabla: Incremento del Factor de Reducción $\Delta\Phi$ debido a la Resistencia a Tracción

e/t	$\bar{\lambda}$	ϕ_e	Resistencia a tracción (f_t/f_c)					
			0%	2%	4%	6%	8%	10%
0.1	0.144	0.786	0.000	0.008	0.001	0.021	0.029	0.040
0.1	0.167	0.782	0.000	0.007	0.001	0.026	0.027	0.038
0.1	0.196	0.775	0.000	0.006	0.016	0.020	0.027	0.041
0.1	0.202	0.774	0.000	0.010	0.015	0.025	0.033	0.039
0.1	0.213	0.771	0.000	0.011	0.013	0.023	0.036	0.044
0.1	0.233	0.766	0.000	0.009	0.021	0.027	0.041	0.040
0.1	0.238	0.765	0.000	0.009	0.020	0.024	0.037	0.042
0.1	0.256	0.760	0.000	0.008	0.022	0.024	0.040	0.049
0.1	0.260	0.759	0.000	0.008	0.017	0.029	0.040	0.048
0.1	0.275	0.755	0.000	0.009	0.023	0.023	0.040	0.050
0.1	0.280	0.754	0.000	0.013	0.017	0.026	0.041	0.048
0.1	0.298	0.748	0.000	0.012	0.015	0.023	0.042	0.047
0.1	0.300	0.748	0.000	0.012	0.025	0.027	0.038	0.053
0.1	0.316	0.743	0.000	0.010	0.019	0.025	0.043	0.052
0.1	0.318	0.742	0.000	0.012	0.023	0.029	0.040	0.053
0.1	0.334	0.737	0.000	0.013	0.024	0.026	0.044	0.048
0.1	0.341	0.735	0.000	0.012	0.024	0.028	0.038	0.044
0.1	0.353	0.731	0.000	0.008	0.020	0.028	0.043	0.045
0.1	0.359	0.729	0.000	0.008	0.019	0.024	0.037	0.045
0.1	0.367	0.727	0.000	0.009	0.018	0.023	0.033	0.044
0.1	0.384	0.722	0.000	0.011	0.023	0.027	0.034	0.041
0.1	0.391	0.719	0.000	0.008	0.023	0.026	0.031	0.036
0.1	0.429	0.707	0.000	0.009	0.021	0.024	0.025	0.034
0.1	0.431	0.707	0.000	0.010	0.014	0.018	0.036	0.040
0.1	0.433	0.706	0.000	0.010	0.013	0.023	0.037	0.033
0.1	0.442	0.703	0.000	0.011	0.016	0.024	0.034	0.032
0.1	0.462	0.697	0.000	0.010	0.014	0.013	0.017	0.022
0.1	0.469	0.695	0.000	0.009	0.018	0.012	0.015	0.018
0.1	0.477	0.692	0.000	0.008	0.010	0.018	0.026	0.025
0.1	0.500	0.685	0.000	0.007	0.013	0.013	0.011	0.013
0.1	0.503	0.684	0.000	0.005	0.016	0.015	0.016	0.019
0.1	0.524	0.678	0.000	0.005	0.014	0.015	0.012	0.013
0.1	0.548	0.671	0.000	0.005	0.010	0.008	0.005	0.012
0.1	0.564	0.666	0.000	0.004	0.012	0.010	0.005	0.012
0.1	0.568	0.665	0.000	0.003	0.010	0.009	0.010	0.011
0.1	0.588	0.659	0.000	0.005	0.006	0.009	0.010	0.011
0.1	0.614	0.652	0.000	0.004	0.010	0.008	0.009	0.011
0.1	0.615	0.652	0.000	0.004	0.010	0.013	0.014	0.015
0.1	0.633	0.647	0.000	0.002	0.007	0.011	0.011	0.010
0.1	0.640	0.645	0.000	0.002	0.004	0.008	0.012	0.012
0.1	0.664	0.639	0.000	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007
0.1	0.694	0.631	0.000	0.002	0.004	0.002	0.003	0.004

0.1	0.715	0.626	0.000	0.002	0.004	0.003	0.006	0.004
0.1	0.722	0.624	0.000	0.002	0.003	0.004	0.005	0.004
0.1	0.745	0.619	0.000	0.001	0.003	0.004	0.003	0.004
0.1	0.750	0.618	0.000	0.001	0.003	0.004	0.003	0.004
0.1	0.767	0.614	0.000	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004
0.1	0.769	0.613	0.000	0.001	0.002	0.004	0.003	0.003
0.1	0.779	0.611	0.000	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003
0.1	0.810	0.604	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003
0.1	0.833	0.600	0.000	0.001	0.002	0.003	0.003	0.002
0.1	0.839	0.599	0.000	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003
0.1	0.900	0.587	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004
0.1	0.902	0.587	0.000	0.001	0.002	0.001	0.003	0.002
0.1	0.906	0.586	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002
0.1	0.947	0.579	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002
0.1	0.975	0.574	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	0.981	0.574	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	0.981	0.573	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.023	0.567	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.059	0.562	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.062	0.562	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.066	0.561	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.096	0.557	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
0.1	1.151	0.550	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.180	0.547	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.192	0.546	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.199	0.545	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.282	0.536	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.286	0.536	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.287	0.536	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.296	0.535	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.385	0.527	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.398	0.526	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.452	0.522	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.509	0.518	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.569	0.515	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.578	0.514	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.704	0.507	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.705	0.507	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.1	1.841	0.501	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.2	0.144	0.577	0.000	0.022	0.034	0.036	0.068	0.069
0.2	0.167	0.569	0.000	0.021	0.035	0.037	0.055	0.058
0.2	0.196	0.559	0.000	0.020	0.036	0.033	0.062	0.057
0.2	0.202	0.556	0.000	0.024	0.031	0.041	0.057	0.068
0.2	0.213	0.552	0.000	0.021	0.041	0.044	0.059	0.068
0.2	0.233	0.544	0.000	0.028	0.042	0.052	0.074	0.084
0.2	0.238	0.541	0.000	0.025	0.033	0.043	0.068	0.064
0.2	0.256	0.534	0.000	0.023	0.045	0.056	0.073	0.093
0.2	0.260	0.532	0.000	0.023	0.041	0.047	0.063	0.075
0.2	0.275	0.525	0.000	0.027	0.047	0.044	0.069	0.082
0.2	0.280	0.523	0.000	0.023	0.037	0.052	0.065	0.095
0.2	0.298	0.514	0.000	0.021	0.048	0.057	0.079	0.083
0.2	0.300	0.514	0.000	0.023	0.042	0.047	0.070	0.090

0.2	0.316	0.506	0.000	0.023	0.045	0.059	0.079	0.096
0.2	0.318	0.505	0.000	0.028	0.043	0.059	0.076	0.097
0.2	0.334	0.498	0.000	0.028	0.048	0.053	0.070	0.093
0.2	0.341	0.494	0.000	0.022	0.042	0.050	0.077	0.096
0.2	0.353	0.489	0.000	0.028	0.040	0.055	0.080	0.105
0.2	0.359	0.486	0.000	0.025	0.046	0.063	0.090	0.093
0.2	0.367	0.482	0.000	0.022	0.038	0.060	0.087	0.090
0.2	0.384	0.474	0.000	0.020	0.045	0.058	0.079	0.084
0.2	0.391	0.470	0.000	0.023	0.047	0.061	0.076	0.089
0.2	0.429	0.453	0.000	0.030	0.052	0.061	0.077	0.096
0.2	0.431	0.452	0.000	0.028	0.045	0.064	0.087	0.094
0.2	0.433	0.451	0.000	0.025	0.042	0.050	0.090	0.093
0.2	0.442	0.447	0.000	0.023	0.051	0.055	0.079	0.104
0.2	0.462	0.438	0.000	0.019	0.037	0.059	0.087	0.090
0.2	0.469	0.434	0.000	0.023	0.044	0.058	0.085	0.088
0.2	0.477	0.431	0.000	0.024	0.037	0.062	0.076	0.084
0.2	0.500	0.421	0.000	0.020	0.042	0.058	0.070	0.097
0.2	0.503	0.419	0.000	0.024	0.048	0.059	0.081	0.090
0.2	0.524	0.410	0.000	0.023	0.032	0.044	0.070	0.081
0.2	0.548	0.401	0.000	0.019	0.036	0.047	0.058	0.069
0.2	0.564	0.394	0.000	0.022	0.031	0.051	0.065	0.080
0.2	0.568	0.393	0.000	0.016	0.032	0.054	0.062	0.069
0.2	0.588	0.385	0.000	0.016	0.034	0.042	0.073	0.064
0.2	0.614	0.376	0.000	0.021	0.040	0.044	0.064	0.069
0.2	0.615	0.375	0.000	0.019	0.035	0.039	0.049	0.065
0.2	0.633	0.369	0.000	0.016	0.030	0.038	0.052	0.058
0.2	0.640	0.366	0.000	0.018	0.022	0.032	0.055	0.059
0.2	0.664	0.358	0.000	0.017	0.033	0.040	0.057	0.061
0.2	0.694	0.348	0.000	0.014	0.022	0.023	0.041	0.054
0.2	0.715	0.342	0.000	0.014	0.028	0.033	0.051	0.065
0.2	0.722	0.340	0.000	0.018	0.016	0.020	0.037	0.045
0.2	0.745	0.333	0.000	0.019	0.024	0.022	0.033	0.043
0.2	0.750	0.332	0.000	0.017	0.021	0.026	0.041	0.046
0.2	0.767	0.327	0.000	0.017	0.012	0.020	0.041	0.047
0.2	0.769	0.326	0.000	0.014	0.016	0.015	0.036	0.042
0.2	0.779	0.324	0.000	0.012	0.017	0.024	0.028	0.038
0.2	0.810	0.316	0.000	0.018	0.017	0.017	0.028	0.038
0.2	0.833	0.310	0.000	0.018	0.016	0.025	0.028	0.035
0.2	0.839	0.309	0.000	0.015	0.016	0.019	0.028	0.030
0.2	0.900	0.295	0.000	0.010	0.018	0.024	0.040	0.041
0.2	0.902	0.295	0.000	0.013	0.020	0.025	0.036	0.040
0.2	0.906	0.294	0.000	0.010	0.014	0.018	0.025	0.029
0.2	0.947	0.286	0.000	0.007	0.009	0.011	0.023	0.030
0.2	0.975	0.281	0.000	0.013	0.017	0.021	0.028	0.032
0.2	0.981	0.280	0.000	0.007	0.013	0.017	0.024	0.027
0.2	0.981	0.280	0.000	0.009	0.019	0.020	0.031	0.024
0.2	1.023	0.273	0.000	0.014	0.003	0.022	0.026	0.028
0.2	1.059	0.267	0.000	0.008	0.009	0.016	0.020	0.025
0.2	1.062	0.267	0.000	0.007	0.011	0.015	0.022	0.027
0.2	1.066	0.266	0.000	0.009	0.004	0.007	0.014	0.027
0.2	1.096	0.262	0.000	0.007	0.012	0.016	0.022	0.024
0.2	1.151	0.255	0.000	0.007	0.007	0.009	0.021	0.014

0.2	1.180	0.251	0.000	0.004	0.010	0.014	0.017	0.020
0.2	1.192	0.250	0.000	0.006	0.004	0.007	0.020	0.009
0.2	1.199	0.249	0.000	0.005	0.005	0.008	0.025	0.020
0.2	1.282	0.240	0.000	0.007	0.011	0.013	0.013	0.013
0.2	1.286	0.240	0.000	0.003	0.005	0.009	0.016	0.019
0.2	1.287	0.240	0.000	0.002	0.006	0.007	0.015	0.018
0.2	1.296	0.239	0.000	0.006	0.007	0.009	0.014	0.018
0.2	1.385	0.231	0.000	0.005	0.010	0.017	0.013	0.012
0.2	1.398	0.230	0.000	0.002	0.006	0.007	0.014	0.017
0.2	1.452	0.226	0.000	0.006	0.009	0.002	0.009	0.005
0.2	1.509	0.222	0.000	0.003	0.004	0.008	0.015	0.010
0.2	1.569	0.218	0.000	0.003	0.005	0.007	0.014	0.010
0.2	1.578	0.218	0.000	0.003	0.009	0.011	0.010	0.011
0.2	1.704	0.211	0.000	0.001	0.002	0.004	0.010	0.003
0.2	1.705	0.211	0.000	0.004	0.004	0.014	0.010	0.004
0.2	1.841	0.205	0.000	0.004	0.001	0.004	0.009	0.005
0.33	0.144	0.373	0.000	0.026	0.045	0.053	0.065	0.077
0.33	0.167	0.364	0.000	0.032	0.046	0.054	0.069	0.089
0.33	0.196	0.352	0.000	0.029	0.045	0.054	0.068	0.081
0.33	0.202	0.349	0.000	0.026	0.044	0.055	0.072	0.089
0.33	0.213	0.344	0.000	0.031	0.049	0.055	0.078	0.086
0.33	0.233	0.335	0.000	0.030	0.047	0.056	0.071	0.085
0.33	0.238	0.333	0.000	0.034	0.049	0.070	0.088	0.092
0.33	0.256	0.324	0.000	0.036	0.050	0.059	0.084	0.090
0.33	0.260	0.322	0.000	0.036	0.051	0.068	0.083	0.098
0.33	0.275	0.315	0.000	0.031	0.046	0.057	0.078	0.085
0.33	0.280	0.313	0.000	0.036	0.052	0.061	0.086	0.106
0.33	0.298	0.303	0.000	0.029	0.047	0.064	0.085	0.101
0.33	0.300	0.303	0.000	0.030	0.051	0.059	0.090	0.105
0.33	0.316	0.295	0.000	0.035	0.063	0.078	0.102	0.117
0.33	0.318	0.294	0.000	0.041	0.063	0.068	0.098	0.111
0.33	0.334	0.286	0.000	0.043	0.062	0.069	0.096	0.110
0.33	0.341	0.283	0.000	0.040	0.059	0.070	0.102	0.105
0.33	0.353	0.277	0.000	0.039	0.058	0.067	0.099	0.113
0.33	0.359	0.274	0.000	0.037	0.060	0.070	0.098	0.117
0.33	0.367	0.270	0.000	0.041	0.056	0.066	0.100	0.107
0.33	0.384	0.262	0.000	0.046	0.065	0.078	0.103	0.117
0.33	0.391	0.258	0.000	0.030	0.055	0.072	0.100	0.107
0.33	0.429	0.241	0.000	0.034	0.054	0.072	0.096	0.114
0.33	0.431	0.240	0.000	0.052	0.072	0.087	0.114	0.134
0.33	0.433	0.240	0.000	0.050	0.061	0.072	0.108	0.120
0.33	0.442	0.236	0.000	0.044	0.066	0.069	0.106	0.124
0.33	0.462	0.227	0.000	0.042	0.069	0.081	0.108	0.123
0.33	0.469	0.224	0.000	0.039	0.065	0.073	0.111	0.123
0.33	0.477	0.221	0.000	0.047	0.075	0.086	0.115	0.133
0.33	0.500	0.212	0.000	0.041	0.060	0.074	0.103	0.121
0.33	0.503	0.210	0.000	0.045	0.067	0.077	0.126	0.129
0.33	0.524	0.202	0.000	0.050	0.070	0.075	0.109	0.114
0.33	0.548	0.194	0.000	0.047	0.062	0.080	0.123	0.140
0.33	0.564	0.188	0.000	0.036	0.058	0.073	0.117	0.125
0.33	0.568	0.187	0.000	0.044	0.071	0.091	0.117	0.133
0.33	0.588	0.180	0.000	0.042	0.054	0.081	0.110	0.128

0.33	0.614	0.173	0.000	0.044	0.057	0.072	0.117	0.130
0.33	0.615	0.172	0.000	0.038	0.069	0.090	0.112	0.136
0.33	0.633	0.167	0.000	0.038	0.073	0.085	0.112	0.129
0.33	0.640	0.165	0.000	0.043	0.055	0.073	0.123	0.134
0.33	0.664	0.158	0.000	0.042	0.075	0.080	0.125	0.138
0.33	0.694	0.151	0.000	0.038	0.059	0.083	0.115	0.132
0.33	0.715	0.146	0.000	0.046	0.065	0.085	0.112	0.134
0.33	0.722	0.144	0.000	0.035	0.057	0.071	0.116	0.140
0.33	0.745	0.139	0.000	0.040	0.054	0.080	0.098	0.133
0.33	0.750	0.138	0.000	0.042	0.065	0.078	0.107	0.133
0.33	0.767	0.135	0.000	0.041	0.051	0.056	0.108	0.117
0.33	0.769	0.134	0.000	0.026	0.067	0.062	0.107	0.108
0.33	0.779	0.132	0.000	0.030	0.061	0.070	0.095	0.117
0.33	0.810	0.127	0.000	0.029	0.053	0.062	0.092	0.108
0.33	0.833	0.123	0.000	0.026	0.040	0.054	0.084	0.093
0.33	0.839	0.122	0.000	0.026	0.050	0.061	0.084	0.100
0.33	0.900	0.112	0.000	0.022	0.045	0.054	0.078	0.085
0.33	0.902	0.112	0.000	0.020	0.041	0.045	0.079	0.094
0.33	0.906	0.111	0.000	0.024	0.049	0.060	0.082	0.099
0.33	0.947	0.106	0.000	0.026	0.046	0.059	0.076	0.085
0.33	0.975	0.103	0.000	0.025	0.047	0.060	0.077	0.083
0.33	0.981	0.102	0.000	0.030	0.044	0.051	0.084	0.091
0.33	0.981	0.102	0.000	0.030	0.044	0.060	0.078	0.087
0.33	1.023	0.097	0.000	0.019	0.039	0.047	0.072	0.083
0.33	1.059	0.094	0.000	0.022	0.031	0.041	0.067	0.079
0.33	1.062	0.094	0.000	0.022	0.031	0.041	0.067	0.079
0.33	1.066	0.093	0.000	0.022	0.038	0.042	0.060	0.070
0.33	1.096	0.090	0.000	0.020	0.031	0.038	0.065	0.081
0.33	1.151	0.086	0.000	0.012	0.028	0.038	0.053	0.062
0.33	1.180	0.084	0.000	0.012	0.028	0.038	0.053	0.062
0.33	1.192	0.083	0.000	0.022	0.025	0.040	0.059	0.072
0.33	1.199	0.083	0.000	0.012	0.029	0.044	0.046	0.053
0.33	1.282	0.077	0.000	0.014	0.033	0.038	0.065	0.074
0.33	1.286	0.077	0.000	0.018	0.018	0.024	0.053	0.060
0.33	1.287	0.077	0.000	0.013	0.016	0.023	0.048	0.056
0.33	1.296	0.077	0.000	0.018	0.026	0.035	0.063	0.071
0.33	1.385	0.072	0.000	0.013	0.022	0.030	0.058	0.066
0.33	1.398	0.072	0.000	0.009	0.013	0.033	0.044	0.049
0.33	1.452	0.069	0.000	0.009	0.014	0.017	0.039	0.054
0.33	1.509	0.067	0.000	0.013	0.022	0.031	0.056	0.064
0.33	1.569	0.065	0.000	0.012	0.016	0.018	0.041	0.049
0.33	1.578	0.065	0.000	0.016	0.021	0.031	0.053	0.039
0.33	1.704	0.062	0.000	0.009	0.012	0.022	0.040	0.047
0.33	1.705	0.062	0.000	0.013	0.016	0.029	0.056	0.044
0.33	1.841	0.059	0.000	0.010	0.014	0.024	0.050	0.034