
CAPÍTULO
5

Capítulo 5 - ANÁLISIS DE RESULTADOS

- 5.1 Introducción
 - 5.1.1 Campo de aplicación
- 5.2 Deformada de la viga
- 5.3 Reacciones en apoyos
- 5.4 Deformaciones en la sección de centro luz de vanos y apoyo intermedio
- 5.5 Comportamiento en los cordones de pretensado
- 5.6 Conclusiones parciales acerca del modelo teórico

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COMPARACIÓN CON EL MODELO TEÓRICO

5.1- INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se exponen y comentan los resultados de las series de ensayos VPE, VHA y VHA + PE descritos en el capítulo anterior. Así mismo, se comparan los resultados obtenidos en la aplicación del modelo numérico.

El objetivo de esta comparación es por una parte, verificar la capacidad a rotura por flexión de las diferentes secciones de cada uno de los modelos de puente, para seguidamente reproducir el comportamiento inicial de dichos modelos, aplicando previamente diferentes técnicas de reparación utilizando fibras sintéticas (Fibras Aramidas y Fibras de Carbono) y pretensado exterior. Y, por la otra, contrastar las relaciones entre el modelo numérico y los resultados experimentales.

En los diferentes análisis numéricos desarrollados para cada uno de los ensayos efectuados en el laboratorio, se han aplicado diferentes escalones de carga, debido a las condiciones de carga impuestas por la convergencia del método iterativo de cálculo para el último escalón de carga impuesto.

El modelo numérico en cuestión para el caso de los ensayos con pretensado exterior, permite a nivel analítico, hacer una evaluación del incremento de tensión del acero activo. Permite el estudio de la no compatibilidad de deformaciones a nivel seccional, incluyendo la no linealidad geométrica (esto es, en casos de grandes desplazamientos, grandes deformaciones o fenómenos de inestabilidad); que es necesaria para tener en cuenta los cambios de excentricidad del pretensado exterior. Por lo que este modelo permite llevar a cabo el análisis de los modelos ensayados hasta la rotura.

De manera general se pueden exponer algunas de las características que posee el modelo de análisis utilizado, las cuales son:

- Posibilidad de modelizar estructuras isostáticas (casos de los modelos VHA1_c, VHA1_d y VHA_PE_b) e hiperestáticas (modelos VPE_1, 2 y 3, VHA1_a y b y VHA_PE_a)
- Permite modelizar tanto el pretensado exterior no adherente como el interior adherente (esta posibilidad no se utilizó debido a las características de los ensayos).
- Puede ser utilizado para el estudio tanto de estructuras monolíticas como construidas mediante dovelas prefabricadas. (este aspecto tampoco se ha utilizado).

- Contempla la no linealidad mecánica y geométrica para poder analizar la estructura hasta rotura. Puntos importantes para generar la modelización de la no existencia de compatibilidad de deslizamientos entre tendones y hormigón.
- Seleccionar deslizamiento libre o impedido de los tendones en los desviadores (siendo ambas situaciones límite del comportamiento real de la estructura).

El modelo de análisis es no lineal, y utiliza la técnica de los elementos finitos para la resolución del sistema de ecuaciones no lineales por medio del sistema Newton-Raphson (iterativo e incremental), manteniendo escalones de carga y control de los deslizamientos. Una descripción del modelo puede verse en [Ramos, G. 1994]

5.1.1 Campo de aplicación

Como ya se ha mencionado, este modelo tiene las características para simular estructuras de hormigón armado y de hormigón pretensado (sea éste interior adherente o exterior no adherente).

Se generan elementos para el estudio de hormigón armado, lo que permite dividir la sección en puntos de integración. El modelo de fisuración adoptado en el método de análisis numérico es de fisuración distribuida de tipo ortogonal, que se basa en variar la ecuación constitutiva de los materiales para modelar la fisuración. Cuando el hormigón alcanza su máxima resistencia a tracción se produce la fisuración, y se considera que el hormigón no puede continuar resistiendo tracciones, lo que permite modelizar fielmente el comportamiento no lineal del hormigón en estado uniaxial de tensiones. La introducción de la colaboración del hormigón traccionado entre fisuras se logra mediante el incremento del módulo de deformación del acero

Los tendones de pretensado adherente se modelizan como segmentos rectos unidos rígidamente a la estructura. Para el pretensado exterior no adherente, mediante una discretización mediante segmentos rectilíneos referenciados a nodos discretos de la estructura. Los segmentos se extienden entre los puntos de contacto entre tendón y estructura.

La no linealidad mecánica se considera actualizando la matriz de rigidez en cada iteración. Para las barras de armado se utiliza la ecuación constitutiva proporcionada por el Código Modelo (CEB-FIP, 1991) y también el de Parábola – rectángulo (nueva EHE).

Las variables que se van a comparar son:

- Deformada de la Viga
- Reacciones en apoyos
- Deformaciones
 - en la sección de centro luz de vanos
 - en apoyo intermedio
- Comportamiento en los cordones de pretensado en aquellos ensayos en los que existe tal pretensado.

A continuación se presentan las variables anteriormente descritas, de forma más detallada:

Los resultados relacionados con la deformada de los modelos requieren dividir su comportamiento en tres fases:

Fase lineal: no se ha presentado aún la fisuración en ninguna parte de la viga.

Fase de prerotura: Se ha producido la fisuración en el hormigón en zona de momento máximo (positivo o negativo según sea el caso), disminuyendo la rigidez de la viga a causa de la fisuración.

Fase de rotura: Se observa una nueva disminución de la rigidez de la estructura, presentándose problemas en la convergencia del método de análisis. La viga se convierte en un elemento con varias rótulas plásticas en zonas de desviador o apoyo intermedio. En los distintos casos se registraron valores diferentes en cuanto al momento de fisuración. Esto pudo haber sucedido debido las diferentes fuerzas de compresión introducidas por el pretensado en los diferentes ensayos.

En la mayoría de los ensayos, durante la fase lineal los resultados obtenidos durante los ensayos comparados con los teóricos, son muy similares. En general en la fase de prerotura se presentan diferencias más perceptibles en la serie VHA_PE; con lo que en la fase de rotura en los modelos de la series VPE y VHA se asemejan notoriamente, siendo la carga de rotura más alta la experimental que la teórica.

No existen diferencias amplias entre las hipótesis de deslizamiento impedido o permitido en los desviadores en los casos de modelos VPE 1, 2 y 3. Para los ensayos de los modelos VHA1_a y VHA_PE_a si se observan diferencias que pueden ser atribuidas a las características físicas de los modelos, ya que el tratamiento del último modelo permitía esperar un incremento importante de la rigidez de la viga. A continuación se presenta una relación en diferentes instantes del análisis numérico y los resultados experimentales. (ver tabla 5.1) Para el caso del ensayo de modelos de 2 vanos (hiperestáticos), que son los únicos para los que se ha construido el modelo numérico.

Ensayo	Inicio fisuración Experimental kN	Inicio fisuración modelo kN	de Fase prerotura experimental kN	de Rotura modelo numérico	Rotura experimental
VPE_1	180	100	355	300	395
VPE_2	150	100	270	300	410
VPE_3	150	100	300	340	360
VHA1_a	45	40	70	85	92,8
VHA1_b	45	30	85	110	98,4
VHA PE a	80	100	145	160	156,6

Tabla 5.1 Comparación entre valores experimentales y teóricos.

5.2 Deformada de la viga

RESULTADOS DEL MODELO TEÓRICO Y VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL:

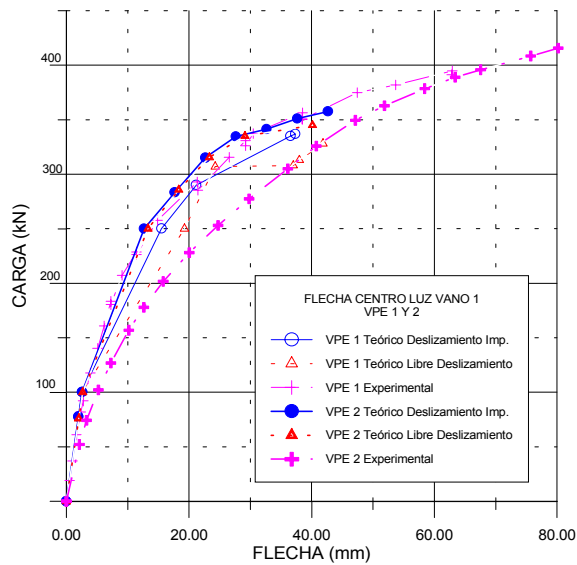


Figura 5.1 Comparativa de la flecha en centro luz serie VPE 1 y 2. (teóricos y Experimentales)

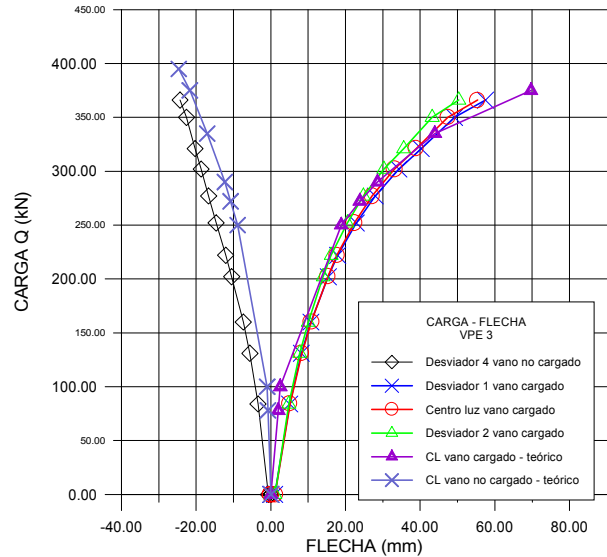


Figura 5.2 Comparativa de la flecha en centro luz (vanos 1 y 2) serie VPE 3.

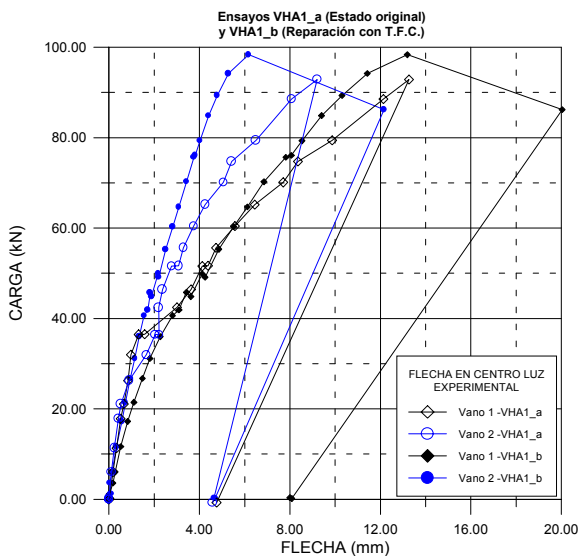


Figura 5.3 Evolución de la flecha en centro luz serie VHA datos ensayo.

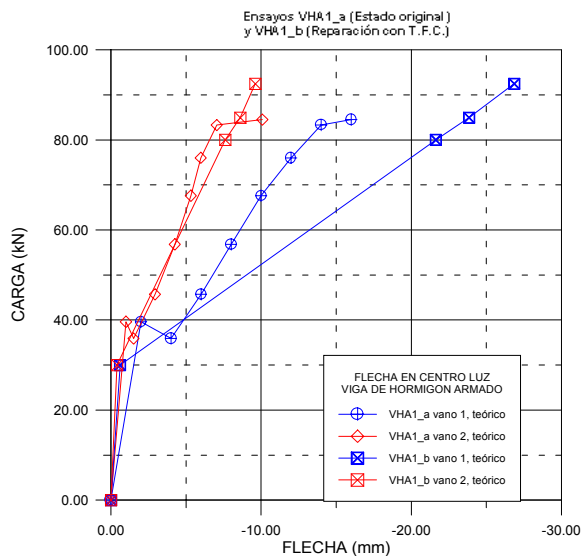


Figura 5.4 Evolución de la flecha en centro luz serie VHA Análisis numérico.

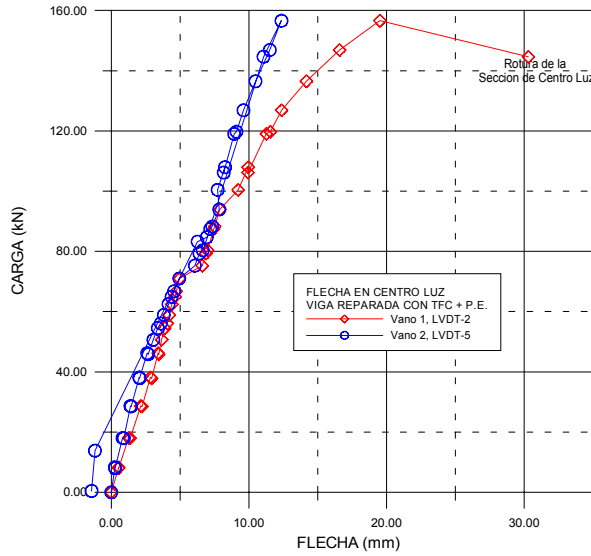


Figura 5.5 Evolución de la flecha en centro luz serie VHA + PE datos ensayo.

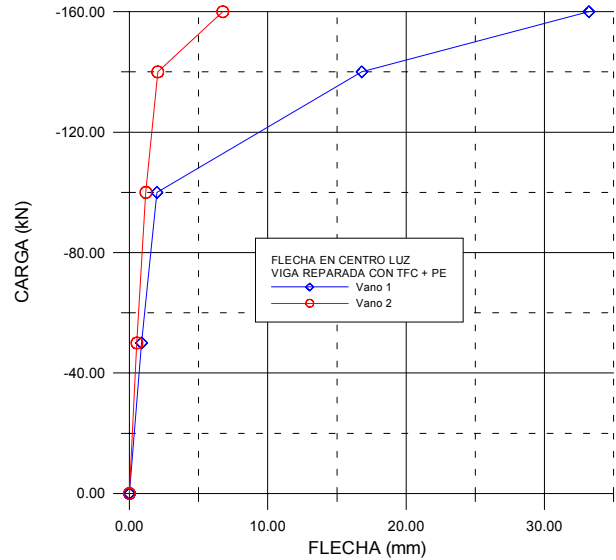


Figura 5.6 Evolución de la flecha en centro luz serie VHA + PE Análisis numérico.

Es de destacar que las figuras 5.5 y 5.6 no son del todo similares en cuanto a su comportamiento, a pesar de este hecho, los niveles de carga alcanzados son muy aproximados. Esta situación puede deberse a que la viga ensayada VHA+PE ya había sido anteriormente ensayada y reparada (series de ensayos VHA1).

5.3 Reacciones en apoyos

En los diferentes modelos se observa una clara redistribución de esfuerzos, como resultado de una variación de la rigidez de las distintas secciones del modelo de puente. Se observa alguna proporcionalidad entre carga y reacciones.

Los valores experimentales en rotura de la serie VHA _ PE son similares a los valores para esos mismos niveles de carga en el análisis numérico; aunque la rotura teórica se produce a una carga un poco más alta. Esta situación se presenta debido a los efectos locales de deformación y redistribución de esfuerzos del ensayo respecto a la modelización.

En las series VPE Los valores teóricos difieren en mayor grado de los valores experimentales. En las series VHA a nivel de las cargas de rotura experimentales y para los ensayos de la serie VHA_PE son más coincidentes, el nivel de carga de rotura teórico es más alto y por lo tanto no son comparables a esos límites.

Estas diferencias en los valores de las reacciones se pueden atribuir en parte a los errores en las medidas obtenidas de las células de carga situadas en los apoyos, ya que las células de las líneas de apoyo de los extremos eran de una capacidad de 2000 kN, por lo que

en términos de rango de trabajo, las mediciones obtenidas se encontraban en la zona baja de dicho rango de medida, por lo cual la exactitud pudo verse afectada.

RESULTADOS:

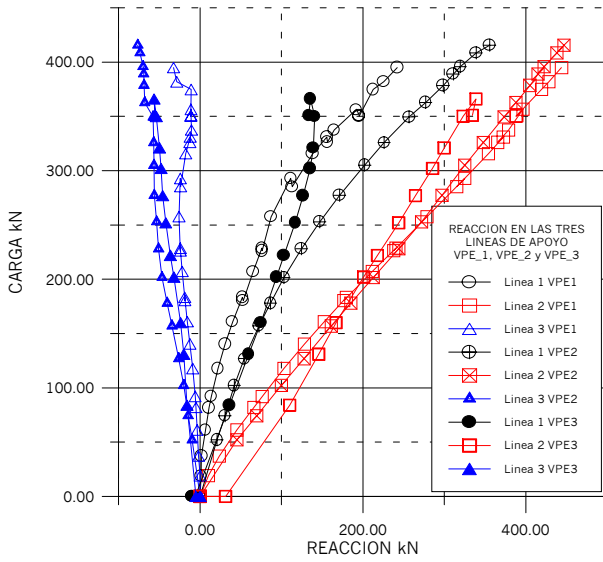


Figura 5.7 Evolución de las reacciones en la serie VPE datos ensayo.

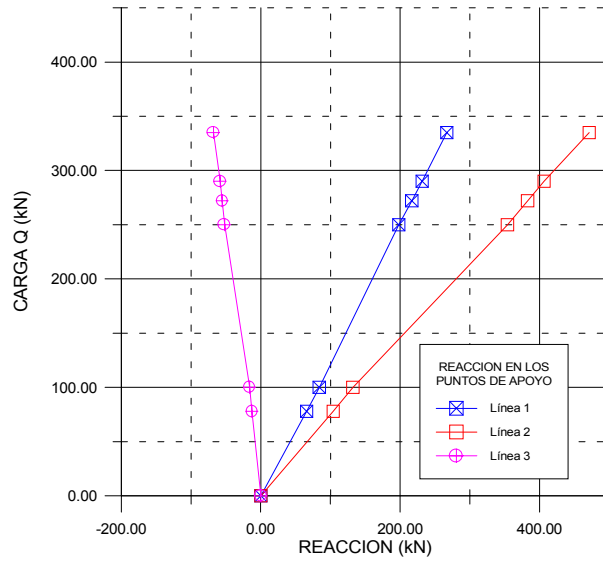


Figura 5.8 Evolución de las reacciones en la serie VPE Análisis numérico.

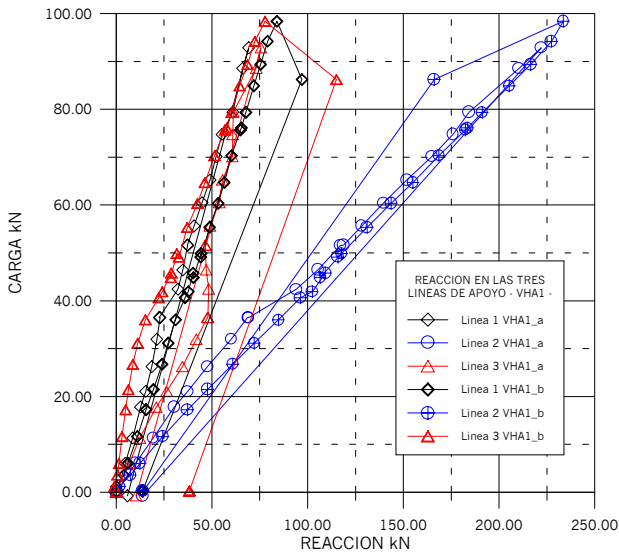


Figura 5.9 Evolución de las reacciones en la serie VHA datos ensayo.

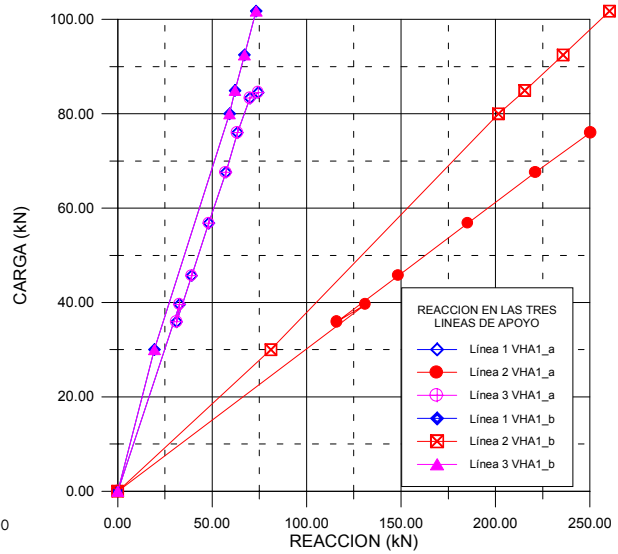


Figura 5.10 Evolución de las reacciones en la serie VHA Análisis numérico.

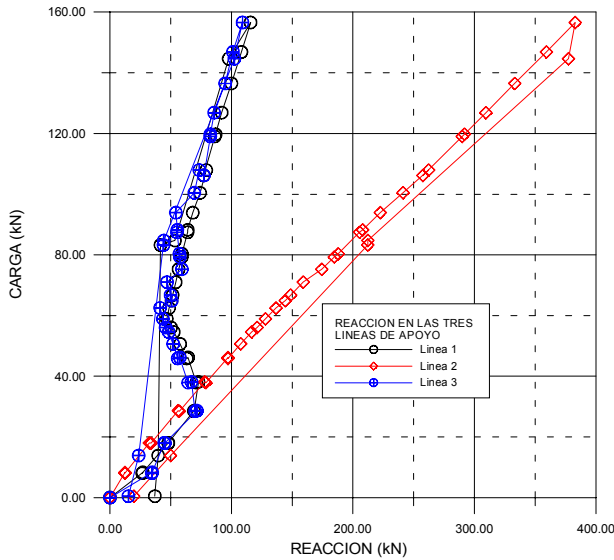


Figura 5.11 Evolución de las reacciones en la serie VHA + PE datos ensayo.

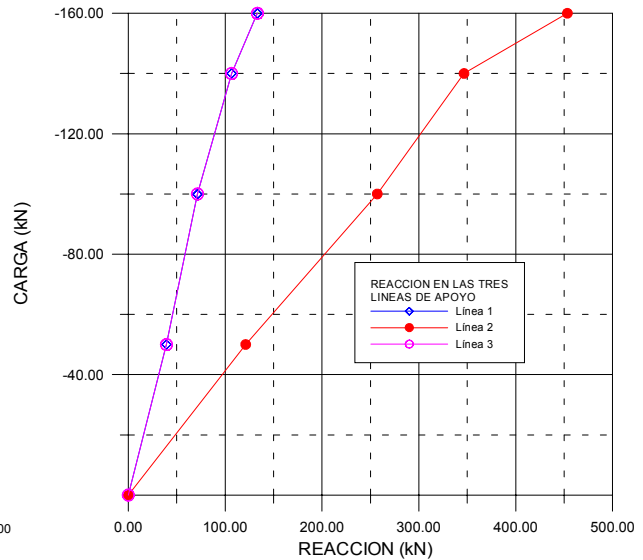


Figura 5.12 Evolución de las reacciones en la serie VHA + PE Análisis numérico.

Tal como puede observarse, el modelo teórico da mucho mejores resultados para las reacciones (fuerzas) que para las flechas (movimientos).

5.4 Deformaciones en la sección de centro luz de vanos y apoyo intermedio

Para el análisis de los resultados de las deformaciones en estas secciones se han tenido en cuenta la posición de la fibra superior de hormigón en la posición axial en planta con las almas, y de la armadura pasiva inferior en el estado original, para el caso de las secciones de centro luz. Y en el caso de las reparaciones y refuerzo: con fibras aramidas ó fibras de carbono; en la fibra inferior ó superior de apoyo intermedio, coincidentes con las superficies exteriores de los refuerzos. La deformación de la armadura pasiva inferior es:

RESULTADOS:

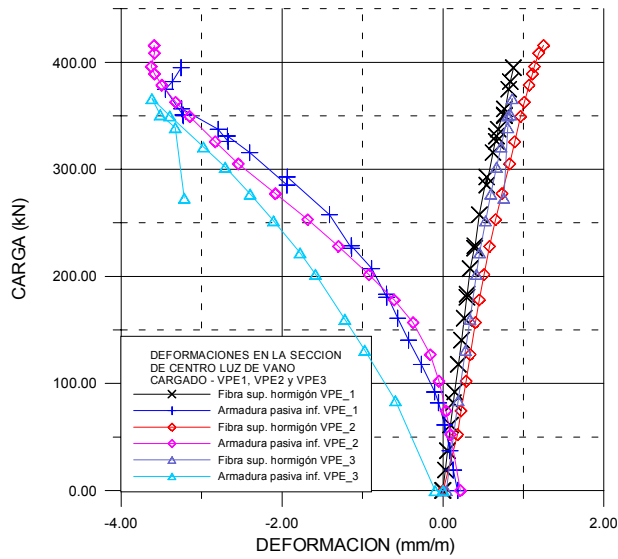


Figura 5.13 Evolución de la deformación en la serie VPE datos ensayo.

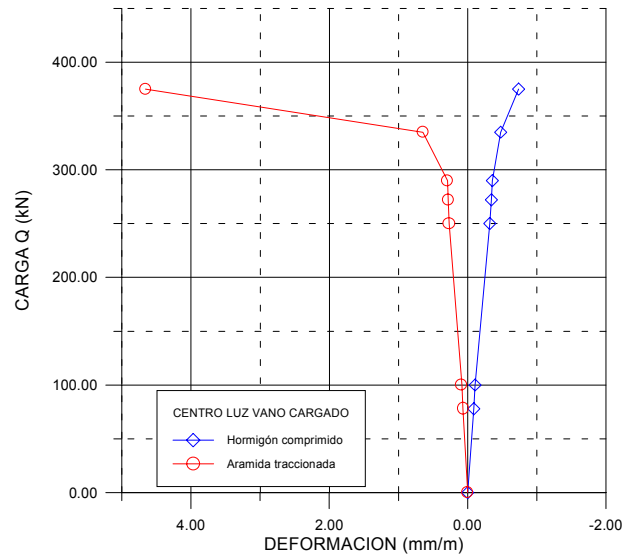


Figura 5.14 Evolución de la deformación en la serie VPE Análisis numérico.

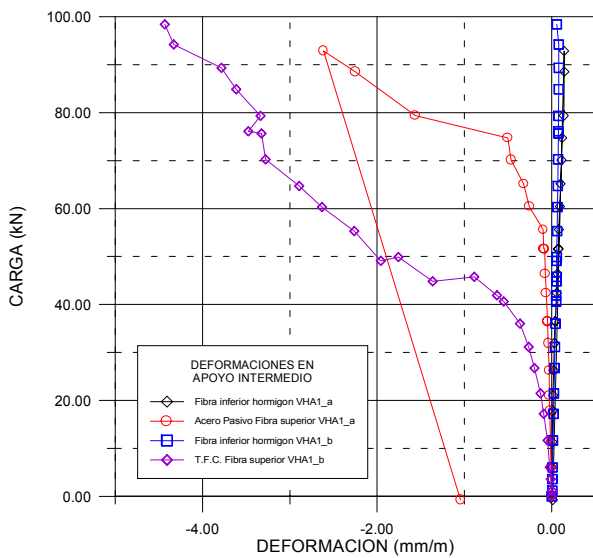


Figura 5.15 Evolución de la deformación en la serie VHA datos ensayo.

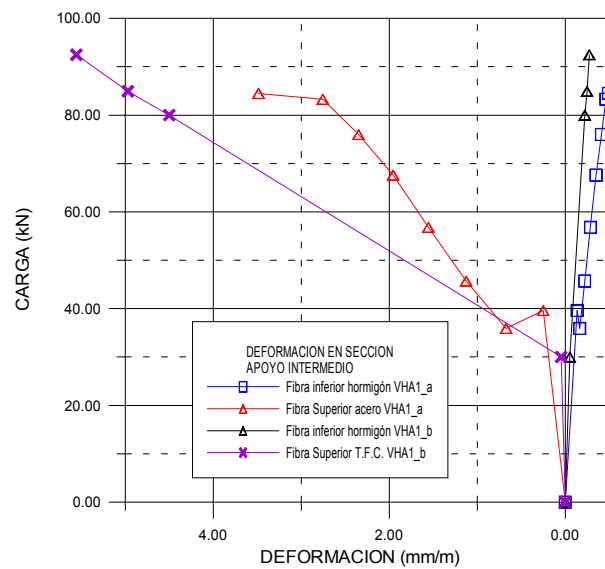


Figura 5.16 Evolución de la deformación en la serie VHA Análisis numérico.

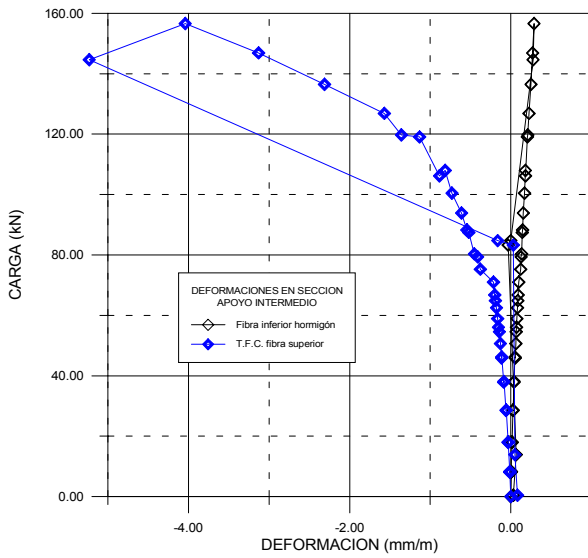


Figura 5.17 Evolución de la deformación en la serie VHA + PE datos ensayo.

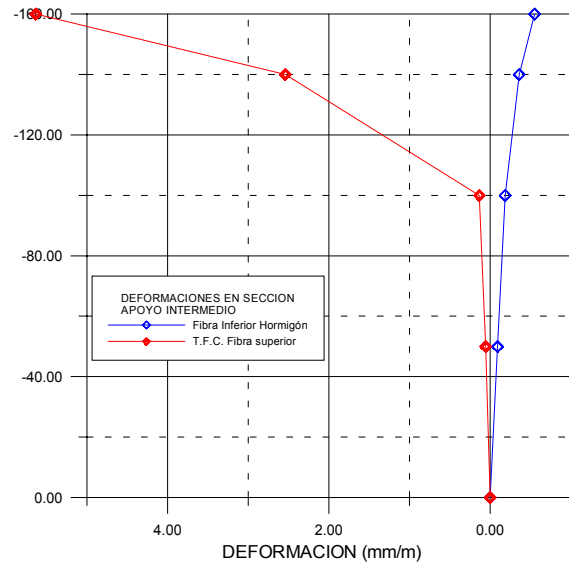


Figura 5.18 Evolución de la deformación en la serie VHA + PE Análisis numérico.

5.5 Comportamiento en los cordones de pretensado

En los cordones de pretensado, se han obtenido los datos experimentales mediante: galgas, células de carga y LVDT's. Los valores iniciales de las tensiones se han obtenido a partir del valor de la fuerza de pretensado en anclajes y el coeficiente de rozamiento calculado.

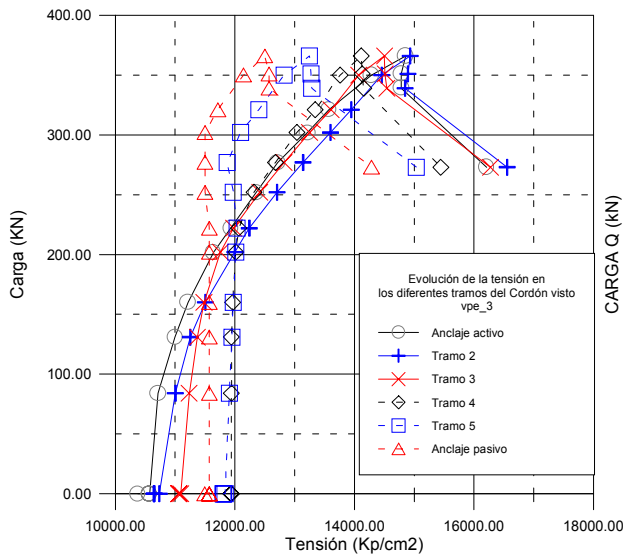


Figura 5.19 Evolución de la tensión en los ensayos serie VPE.

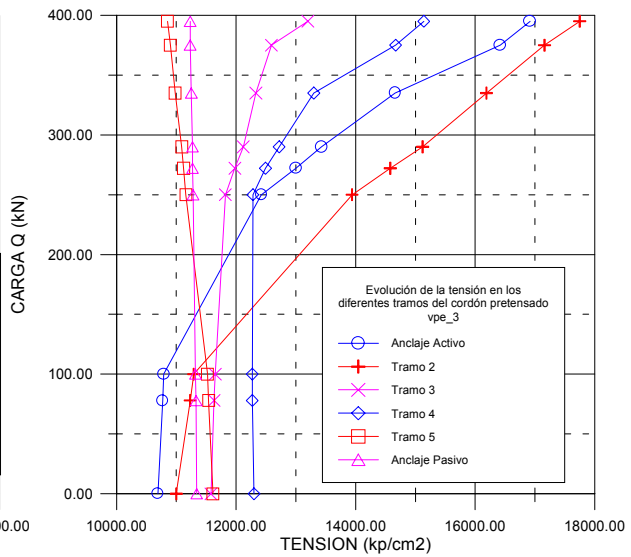


Figura 5.20 Evolución de la tensión en los ensayos serie VPE Análisis numérico.

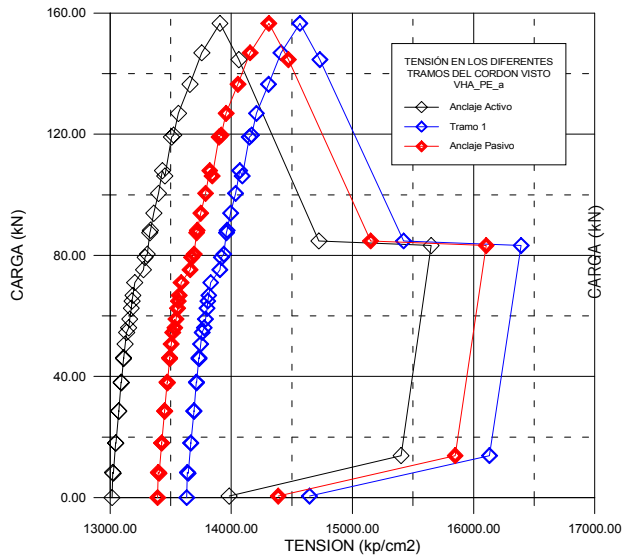


Figura 5.21 Evolución de la tensión en los ensayos serie VHA + PE.

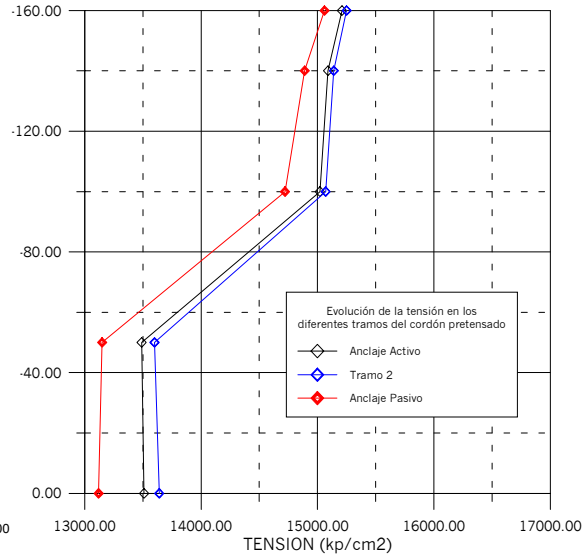


Figura 5.22 Evolución de la tensión en los ensayos serie VHA + PE Análisis numérico.

5.6 Conclusiones parciales acerca del modelo teórico

De las observaciones de los resultados obtenidos en los ensayos y la aplicación del modelo numérico se desprende que la deformabilidad en la fase experimental es mayor que la que se preveía en el modelo numérico, aunque en general se obtuvo un grado de coincidencia muy alto. Se puede ver esta tendencia con más claridad en la fase lineal y en la de pre-rotura. En la fase de rotura los valores teóricos y experimentales se van alejando unos de otros, esto se debe a la dificultad de converger mediante el modelo para cargas próximas a la rotura.

Para la introducción en el modelo de las tensiones en los cordones de pretensado, se puede considerar la existencia en cada desviador de: libre deslizamiento o tener el deslizamiento impedido. La hipótesis de libre deslizamiento es la más frecuentemente utilizada ya que es la que más se aproxima a lo realizado en los ensayos; excepto para el caso del ensayo VPE_2. La evaluación que el modelo hace de las tensiones durante la fase lineal, en los ensayos VPE_1, VPE_2, VPE_3 y VHA+PE son coincidentes en alto grado. No se observa la misma situación en la zona no lineal.

A nivel general, y por lo que respecta al comportamiento seccional, se puede observar el alto grado de coincidencia entre los diferentes modelos teóricos y su correspondiente ensayo experimental. Este dato está contrastado adicionalmente en los ensayos VHA_PE_a y VHA_PE_b por la utilización del sistema de medición por fibra óptica utilizado y las galgas embebidas en el tejido de fibra de carbono; en zona de momentos negativos y positivos.

Los modelos teóricos de los diferentes ensayos, reproducen adecuadamente el comportamiento tanto de zonas sujetas a deformaciones seccionales producidas por momentos positivos (zonas de centro luz) y deformaciones producidas por momentos negativos (zona de apoyo intermedio), describiendo convenientemente el comportamiento de zonas comprimidas y traccionadas. Contrastando los valores del modelo con los obtenidos experimentalmente se puede establecer que existe mayor deformabilidad en los datos experimentales respecto al modelo

En cuanto a la medición de las reacciones en las diferentes líneas de apoyo, como ya se ha comentado, se observa una redistribución de esfuerzos, debida a la alteración de la rigidez de las distintas secciones de la viga durante cada uno de los escalones de carga aplicados. Aunque se debe hacer notar que en el análisis de lecturas a partir de las células de carga, se han tenido que hacer pequeñas compensaciones, debido a que no se ha obtenido equilibrio (en fases tempranas de carga). Una explicación de este hecho es que las células utilizadas estaban funcionando en el rango bajo de carga por falta de sensibilidad (rango óptimo hasta 2000 kN).

