



5

Capítulo

Análisis Comparativo de Resultados

5 Análisis Comparativo de Resultados

5.1 Introducción

En este capítulo se comparará el comportamiento de las vigas de dovelas ensayadas durante la campaña experimental con los datos obtenidos a partir del modelo numérico desarrollado por Gonzalo Ramos en su tesis doctoral [RAMOS, 1994], con el fin de visualizar los cambios en el comportamiento de las vigas reforzadas con CFRP y poder así redactar las conclusiones finales.

Hay que tener en cuenta que la modelización teórica no tiene como objetivo principal desarrollar un modelo numérico que simule de forma precisa el comportamiento de las vigas de dovelas reforzadas con CFRP, sino proporcionar los datos necesarios para realizar la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales con el comportamiento de vigas no reforzadas, además de presentar una modelización sencilla de las vigas reforzadas con los materiales compuestos (TFC, CFK), basándose en hipótesis sencillas que simplifiquen el proceso de modelización y que permitan la utilización del modelo de análisis contemplado, ya que como se mencionó en la introducción de esta tesis, este estudio se centra principalmente en la interpretación de los ensayos experimentales y no en el desarrollo de un modelo teórico de comportamiento.

5.2 Modelo de Análisis

A continuación se dará una explicación del modelo numérico y de las diversas consideraciones que se tomaron en cuenta para la modelización teórica de las vigas, para posteriormente mostrar los resultados obtenidos haciendo los comentarios pertinentes para formular las discusiones finales de este trabajo de investigación.

5.2.1 Introducción

El modelo de análisis utilizado, permite modelizar cualquier estructura con pretensado exterior, tanto en servicio como en estados avanzados de carga, empleando tres tipos de elementos:

- a. *Elementos de hormigón armado*, mediante elementos lineales de dos nodos con formulación tipo Bernouilli.
- b. *Elementos de pretensado*, unidos a los nodos de la estructura mediante uniones rígidas que giran y se desplazan con la sección.
- c. *Elementos junta*, distribuyendo la apertura de junta sobre un elemento de longitud finita.

5.3 Modelización de las Vigas

A continuación se define tanto la discretización longitudinal como transversal de las vigas, dando a conocer las diferentes secciones transversales utilizadas en el modelo de análisis.

a. *Discretización longitudinal*. La no linealidad mecánica, se tiene en cuenta actualizando la matriz de rigidez en cada iteración. Para evaluar esta rigidez, se discretiza la sección transversal del elemento en una serie de filamentos longitudinales, mediante una técnica análoga a como se discretiza la geometría en elementos finitos isoparamétricos. Por tanto, se definieron las vigas longitudinalmente en el modelo numérico mediante 17 nodos, conformando 16 elementos como se muestra en la figura 5.1. Se puede observar la definición de los nodos en la numeración inferior en **Negritas** y en la numeración superior en *Cursivas* la definición de los elementos viga.

b. *Discretización transversal*. La técnica consiste en discretizar la sección en una serie de cuadriláteros cualesquiera, los cuales mediante un cambio de coordenadas se transforman en cuadrados normalizados. Son estos cuadriláteros normalizados los que

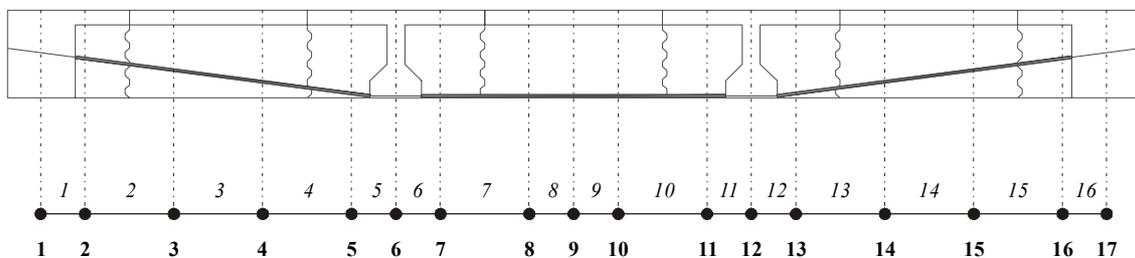


Figura 5.1. Discretización longitudinal de las vigas de dovelas para el modelo numérico (**Nodos**, *Elementos*).

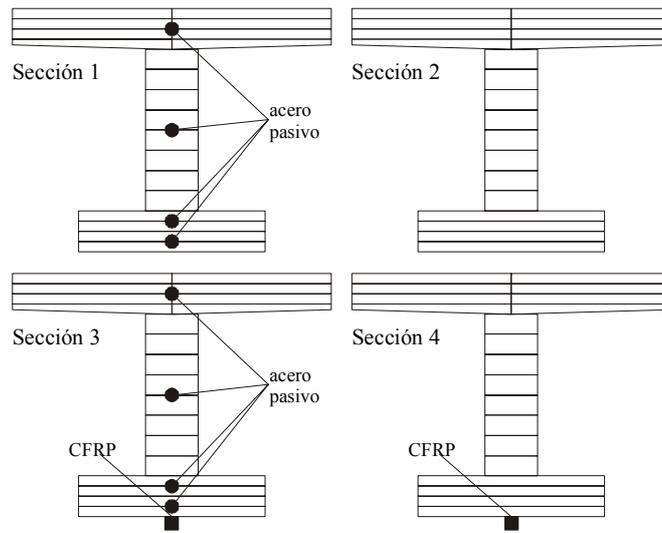


Figura 5.2. Discretización transversal de las vigas. Sección 1: Normal, Sección 2: Junta, Sección 3: Normal reforzada con CFRP, Sección 4: Junta reforzada con CFRP.

se discretizan de forma uniforme en puntos de integración, que determinan los filamentos asignando a cada punto su área tributaria. Se definieron 4 tipos diferentes de secciones. La sección 1 para los elementos normales, la sección 2 para los elementos junta, la sección 3 para los elementos reforzados con CFRP y por último la sección 4 para las juntas reforzadas con CFRP como se muestra en la figura 5.2. Cabe mencionar que el CFRP se modelizó como una barra de acero con adherencia perfecta entre el hormigón y ésta, considerando las propiedades mecánicas de cada material (TFC, CFK).

5.4 Resultados del Modelo Numérico

Las tres vigas ensayadas se analizaron con el modelo teórico anteriormente descrito hasta la carga máxima registrada durante los ensayos con y sin refuerzo de CFRP, considerando las características mecánicas de los materiales utilizados durante los ensayos experimentales (hormigón, acero activo, acero, pasivo, TFC y CFK). Cabe mencionar que los valores de pretensado, coeficientes de fricción en desviadores y penetraciones de cuña se tomaron en cuenta para cada una de las vigas según los datos obtenidos en el capítulo 3.

En todas las gráficas mostradas a continuación se designará al modelo matemático de la viga *Reforzada con CFRP* como *Modelo*, asimismo, al modelo matemático de la viga

No Reforzada con CFRP se designará como *Control* y los ensayos experimentales se designarán con el nombre del ensayo (*VD-TFC1*, *VD-TFC2* y *VD-CFK1*).

5.4.1 Análisis comparativo de la viga VD-TFC1

En la figura 5.3 se muestra la evolución de la flecha en el centro del vano tanto para la viga *VD-TFC1*, la viga *Modelo* y la viga de *Control*. Se puede observar a primera vista que el comportamiento de la viga *VD-TFC1* es más parecido al de la viga *Control* que al *Modelo* teórico hasta una carga aproximada de 120kN, sin embargo, como se comentó en el capítulo 4, la flecha registrada durante el ensayo de esta viga fue influenciada por la reparación monolítica realizada en la junta dañada, por lo que los datos obtenidos del ensayo experimental son poco fiables para compararlos con el modelo numérico.

De cualquier manera se puede visualizar un cambio de rigidez en estados avanzados de carga si comparamos la viga *Modelo* con la viga *Control*. Sin embargo, la ausencia de refuerzo de CFRP en la totalidad de las juntas ocasiona una apertura localizada en las juntas sin refuerzo, debida al cambio de rigidez seccional tan importante en estas juntas, lo cuál produce que el aumento de rigidez global sea relativamente bajo en comparación al obtenido en los ensayos *VD-TFC2* y *VD-CFK1* como se mostrará más adelante cuando se analicen dichos ensayos.

La figura 5.4 muestra la comparativa entre las tensiones en el acero de pretensado. Del mismo modo que en la flecha, el comportamiento de la viga *VD-TFC1* se asemeja

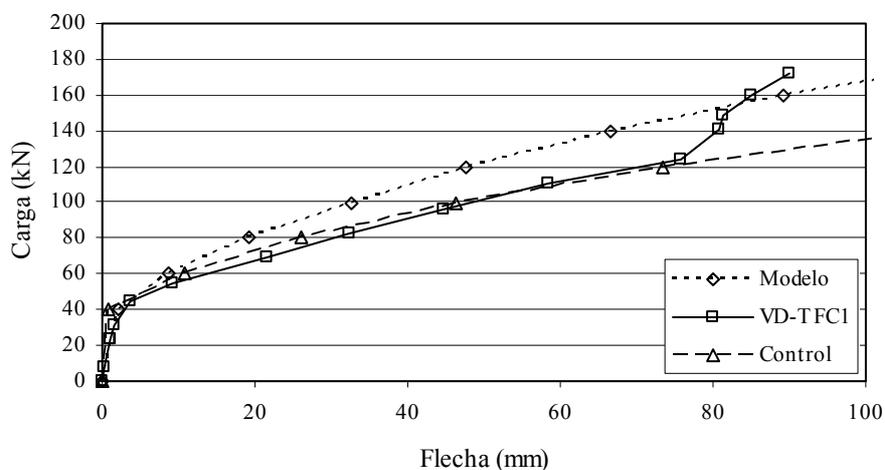


Figura 5.3. Gráfica comparativa Carga-Flecha, viga VD-TFC1.

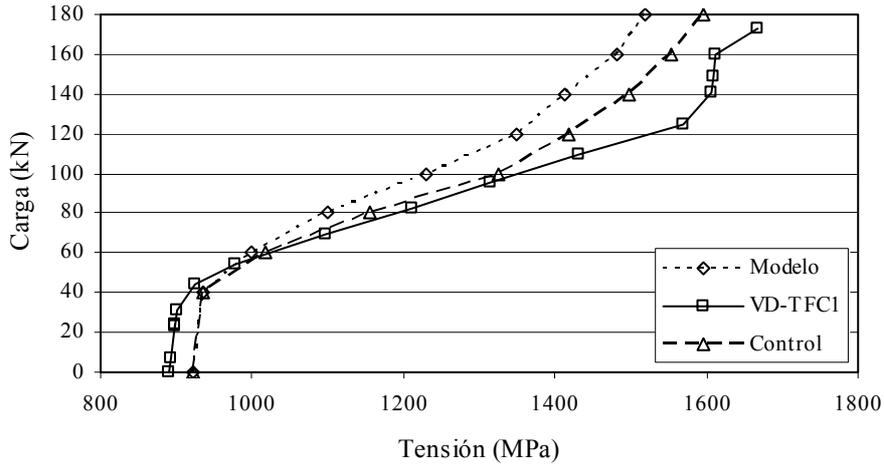


Figura 5.4. Gráfica comparativa Carga-Tensión de pretensado, viga VD-TFC1.

bastante al de la viga *Control* al principio del ensayo, sin embargo, al pasar de 100kN se observa una separación entre gráficas ocasionada posiblemente por el inicio de fisuración en la junta reparada. Se puede observar como al final del ensayo la pendiente de la gráfica de la viga *VD-TFC1* tiende a parecerse a la de la viga *Modelo*, posiblemente por la redistribución de apertura entre juntas descrita anteriormente en el capítulo 4.

5.4.2 Análisis comparativo de la viga VD-TFC2

En la figura 5.5 se muestra la evolución de la flecha en el centro del vano tanto para la viga *VD-TFC2*, la viga *Modelo* y la viga de *Control*.

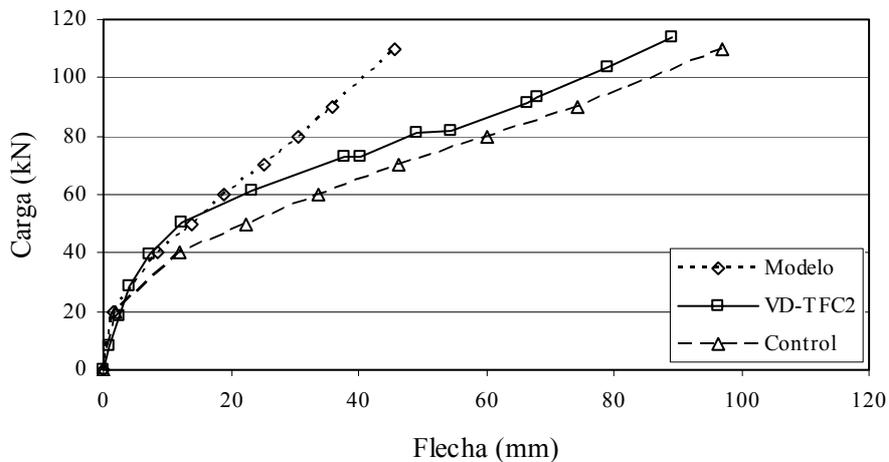


Figura 5.5. Gráfica comparativa Carga-Flecha, viga VD-TFC2.

En la gráfica Carga-Flecha de la viga *VD-TFC2* se pueden observar varios fenómenos interesantes. El primero y posiblemente más importante, es la similitud de las curvas de la viga *Modelo* y la viga *VD-TFC2* hasta niveles intermedios de carga, demostrando que el comportamiento inicial del TFC corresponde al de una barra de acero con adherencia perfecta.

Por otra parte, el punto en el que las gráficas comienzan a separarse, coincide con el momento en el que se registró el despegue inicial del FRP, lo cual puede constatarse observando la gráfica 4.19 mostrada anteriormente en el capítulo 4. Se puede verificar un aumento de rigidez global del sistema que se mantiene relativamente constante hasta el desprendimiento del TFC, por lo que se puede suponer que la aportación del TFC a la resistencia del sistema permanece constante hasta el desprendimiento total del refuerzo. Este hecho se puede contrastar al observar la gráfica 4.19 del capítulo 4, en donde se observa que al igualarse la deformación en el TFC en todas las galgas extensométricas situadas próximas a la junta, la deformación no se incrementa en los escalones sucesivos de carga, por lo que la contribución del FRP se puede considerar constante durante el proceso de despegue.

Todas estas observaciones demuestran la relación que existe entre la aportación del sistema de refuerzo y la deformación de despegue admisible del mismo. Por otra parte, al observar el comportamiento de la viga *Modelo*, podemos confirmar la contribución

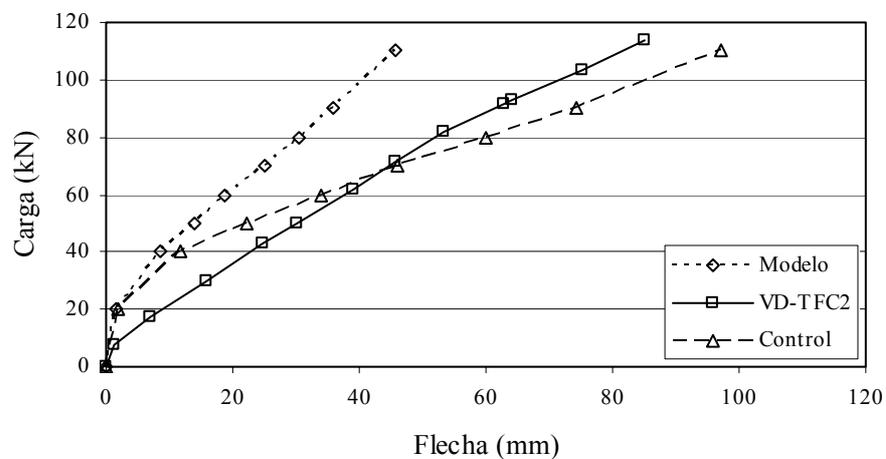


Figura 5.6. Gráfica comparativa Carga-Flecha, etapa 3, viga VD-TFC2.

tan importante del FRP en caso de que no se presentara el fenómeno de “peeling”.

Uno de los aspectos interesantes que se observaron en este ensayo, fue la pérdida de rigidez inicial de la viga después de realizar el ciclo carga-descarga.

En la figura 5.6 se muestra la evolución de la flecha de la viga *VD-TFC2* en la tercera y última etapa de carga, comparada con la viga *Modelo* y la viga *Control*. Se puede observar la disminución tan importante de rigidez que experimentó la viga en las etapas iniciales de carga, pudiéndose intuir hipotéticamente que se debió a una posible microfisuración en la parte superior de las dovelas originada por la deformación a la que se sometió el sistema en las dos primeras etapas de carga-descarga originada por el pretensado tan bajo utilizado en los ensayos.

En la figura 5.7 se muestra la gráfica comparativa Carga-Tensión de pretensado de la viga *VD-TFC2*. Se puede observar que la tensión en el pretensado disminuye considerablemente por la influencia del refuerzo de TFC, por lo que posiblemente la carga de rotura de sistemas constituidos por dovelas y reforzados con este tipo de sistemas no se incremente sustancialmente por la contribución del mismo, debido a la disminución del incremento de pretensado, aunque sería necesario la realización de un estudio paramétrico para poder afirmar esta hipótesis, ya que con la información mostrada en este trabajo de investigación es muy difícil llegar a sacar conclusiones irrefutables que corroboren este fenómeno.

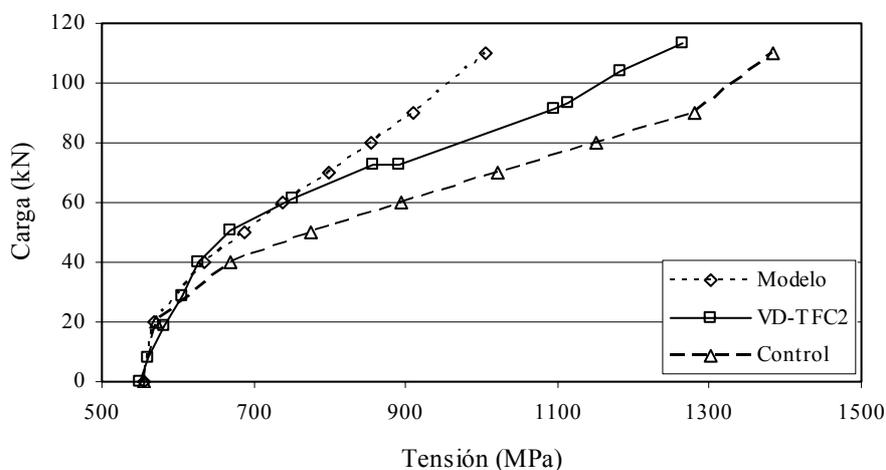


Figura 5.7. Gráfica comparativa Carga-Tensión de pretensado, viga *VD-TFC2*.

5.4.3 Análisis comparativo de la viga VD-CFK1

En la figura 5.8 se muestra la evolución de la flecha central de la viga *VD-CFK1* y las curvas comparativas con la viga *Modelo* y la viga *Control*. Al igual que en la viga *VD-TFC2* se observa una rigidización del sistema en niveles intermedios de carga que se ve disminuida al presentarse el despegue del FRP, como puede constatarse al observar la gráfica 4.32 mostrada anteriormente en el capítulo 4. Se puede observar además que la rigidización que se mantenía constante hasta el final del despegue no se presenta en este sistema de refuerzo, debido a la rigidez transversal del laminado, siendo muy propicio al despegue debido a alteraciones puntuales en la superficie de soporte. Este fenómeno se tratará en las discusiones finales de este trabajo.

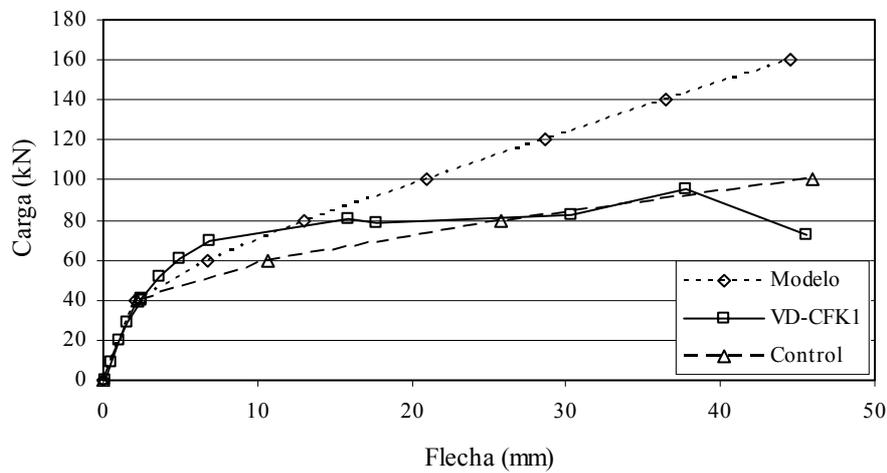


Figura 5.8. Gráfica comparativa Carga-Flecha, viga VD-CFK1.

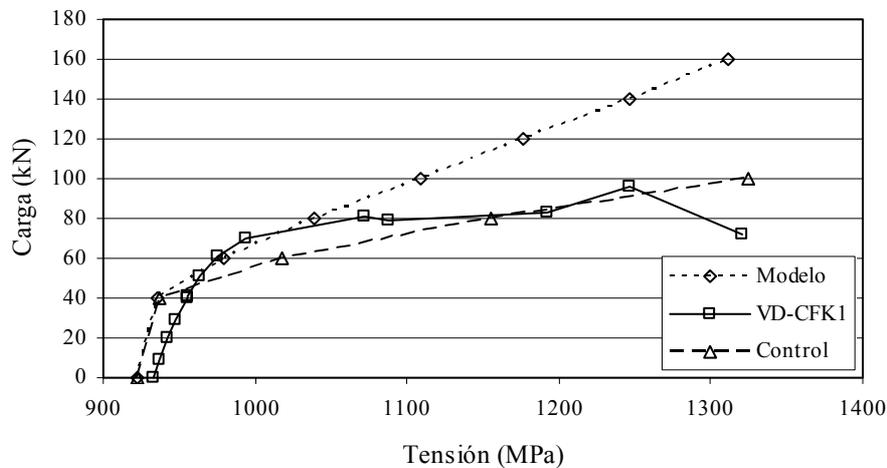


Figura 5.9. Gráfica comparativa Carga-Tensión de pretensado, viga VD-CFK1.

Del mismo modo que en la viga VD-TFC2, podemos observar la pérdida de rigidez debida al despegue del FRP ocasionado por el fenómeno de “peeling”, lo que motiva a un estudio referente a métodos alternativos de anclaje que eviten la aparición de este fenómeno en este tipo de sistemas estructurales.

En la figura 5.9 se muestra la gráfica comparativa de las tensiones de pretensado en la viga VD-CFK1, en donde se observa la disminución en el incremento de pretensado ocasionado por el sistema de refuerzo de FRP, lo que refuerza la hipótesis planteada en el punto anterior, sin embargo, como se mencionó en el planteamiento de esta hipótesis, la información aportada en este estudio no es suficiente para poder afirmar este tipo de comportamiento en sistemas estructurales constituidos por dovelas.