

4

Capítulo

Resultados de los Ensayos Experimentales

4 Resultados de los Ensayos Experimentales

Los resultados experimentales se interpretarán a partir de los datos numéricos obtenidos de los ensayos, a través de la comparación realizada en las gráficas referentes a cada uno de éstos, las cuales servirán para buscar leyes o comportamientos que relacionen los parámetros cuantificables entre los tres tipos de ensayos (vigas de dovelas, ensayos de adherencia y tracción directa).

En este capítulo se darán a conocer los datos obtenidos tras realizar la campaña experimental, se describirá, asimismo, el desarrollo de los ensayos y las observaciones de las particularidades de los mismos, aunque no se establecerán criterios de diseño, ya que éstos se plantearán y discutirán más tarde en capítulos posteriores.

Del mismo modo que en el capítulo anterior, se mostrarán primero los datos referentes a las vigas de dovelas, seguidos de los resultados obtenidos en los ensayos realizados en las probetas de adherencia y por último, la información relacionada a la caracterización de los CFRPs a tracción directa, a partir de los ensayos basados en la normativa ASTM D 3039.

Debido a la extensión de la información generada durante la etapa experimental, en este capítulo se mostrará sólo parte de ésta, con el fin de dar a conocer el comportamiento representativo de los ensayos realizados, evitando así caer en una redundancia excesiva. Por esto, se ha decidido recoger en su totalidad la información generada por los ensayos en los anejos situados al final de este documento para cualquier referencia o aclaración.

4.1 Vigas de Dovelas

En los ensayos realizados con las vigas de dovelas se centrará la atención en tres conjuntos de datos principales; el primero referente a la rigidez de las vigas a partir de la flecha registrada en la dovela central; el segundo relacionado con el pretensado exterior, mostrando los incrementos de tensión registrados en los tendones en la zona de anclajes y en el tramo central, así como el desplazamiento relativo de los tendones en los desviadores; y por último y más importante, relacionado con la deformación registrada en las galgas extensométricas colocadas en el CFRP a lo largo de la viga y en especial en la zona de juntas de dovela.

El resto de información generada por la instrumentación instalada en las vigas, se utilizó con el objeto de tener datos de control que pudieran utilizarse en el caso de disparidad en la información generada durante el ensayo, debido a la complejidad de todo el conjunto, disminuyendo así posibles errores u omisiones causados por defectos en la instrumentación, cableado, programa y/o sistema de adquisición de datos. Toda la información generada por los ensayos realizados en las vigas de dovelas se recoge en el Anejo A.

Cabe señalar que las deformaciones obtenidas en las galgas extensométricas colocadas en el hormigón en la sección central (ver Anejo A), tienen importantes variaciones cuando se comparan las del lado visto de la viga con las del lado oculto. Además, aunque se observa que se cumplen las hipótesis de Navier, no concuerdan las deformaciones registradas en las galgas colocadas en el acero pasivo, por lo que los resultados obtenidos a partir de las galgas colocadas en el hormigón no son fiables. Este fenómeno se había observado anteriormente en los ensayos realizados por Anlló (1996) y Gómez (1995) al realizar ensayos con este tipo de vigas. Por otro lado, las diferencias de deformaciones obtenidas en las galgas colocadas en el acero pasivo traccionado GA1 y GA3, son fácilmente explicadas, teniendo en cuenta el cambio de geometría al que se sometió la viga en el momento de la reparación de las juntas dañadas, lo que produjo torsiones parásitas en la sección y por consiguiente deformaciones asimétricas respecto a su generatriz. De cualquier forma, este tipo de tensiones parásitas no afectan de forma significativa al comportamiento del CFRP y de la viga en general.

Nota: La carga mostrada en las gráficas contenidas en este capítulo, se refiere a la carga por gato hidráulico Q y no a la carga total $2Q$.

4.1.1 VD-TFC1

4.1.1.1 Introducción

El ensayo se llevó a cabo mediante escalones de carga como se mencionó en el capítulo 3, en cada uno de los escalones de carga se hizo una lectura de la instrumentación que se registró en un archivo de datos el cual fue posteriormente procesado para su interpretación.

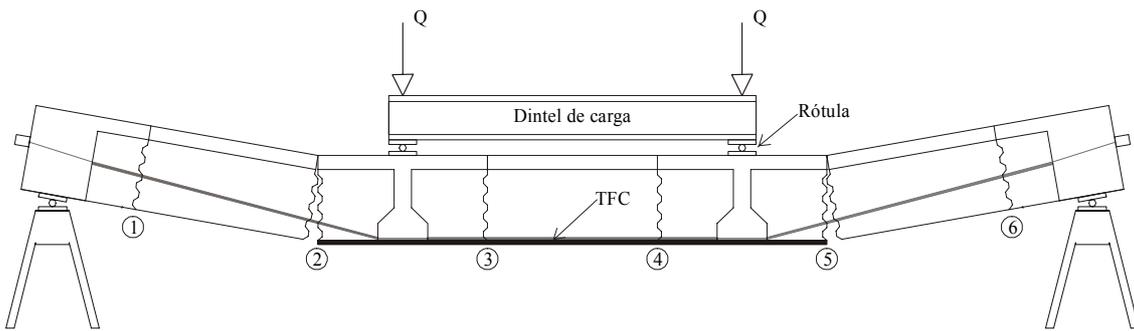


Figura 4.1. Configuración deformada de la viga VD-TFC1

Se llegó a un nivel de carga de 172kN en cada uno de los gatos, el cual estaba ligeramente por encima de la carga de rotura calculada previamente (160kN), de tal forma que el acero de pretensado alcanzó tensiones cercanas a su límite elástico, por lo que se tomó la determinación de parar el ensayo para evitar cualquier tipo de incidente.

Se esperaba que la apertura de las juntas centrales 3 y 4, generara el despegue de la fibra



Figura 4.2. Ensayos de la viga VD-TFC1; (Izq.) Detalle de la junta al inicio del ensayo; (Der.) Detalle de la junta en fase de rotura.

a partir de esta zona, pero en lugar de esto, al reforzarse únicamente las juntas centrales, la viga se comportó como si estuviera constituida por 5 dovelas solamente, ya que las tres centrales al estar unidas por su parte inferior con el CFRP, tuvieron un comportamiento monolítico, produciendo la apertura de las juntas próximas sin refuerzo (2 y 5), como se muestra en el esquema 4.1.

En la figura 4.2 se puede observar en detalle la junta número 5 antes de abrirse y al final del ensayo. En la figura derecha se puede observar una apertura importante en la junta y el aplastamiento del hormigón en la parte superior de la junta.

4.1.1.2 Evolución de la flecha máxima con la carga

La flecha máxima se registró en la dovela central mediante el LVDT colocado al centro del claro de acuerdo con la figura 3.10. En la figura 4.3 se muestra la evolución de la flecha respecto a los escalones de carga.

Se puede observar una rama elástica inicial hasta una carga aproximada de 40kN, precedida de un cambio de pendiente que concuerda con la apertura de la junta entre dovelas número 5 (figura 4.1). Al llegar a una carga de 120kN, se observa un nuevo cambio de pendiente originado por la fisuración y apertura de la junta número 2 que había sido reparada monolíticamente, la cual al abrirse modificó el comportamiento de la viga debido al cambio de deformada de ésta, originando una redistribución en la

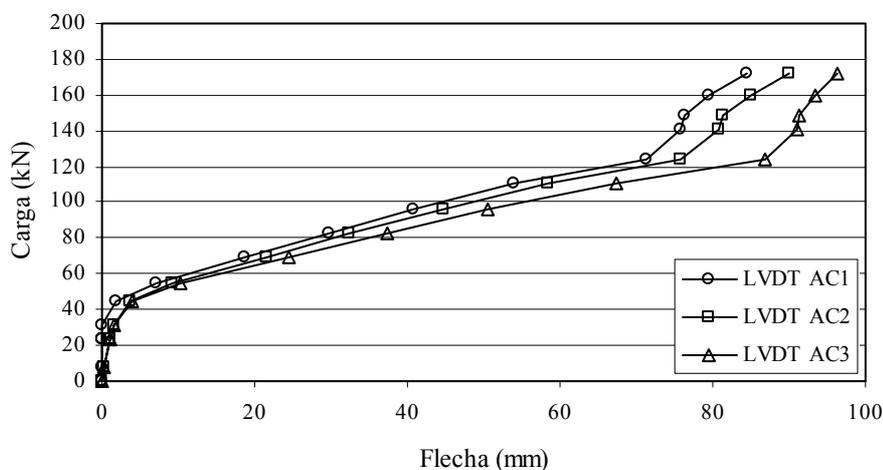


Figura 4.3. Gráfica Carga-Flecha de la viga VD-TFC1

apertura de juntas que produjo una recuperación relativa en la flecha central y una ganancia de rigidez del sistema. La redistribución de apertura entre juntas puede constatarse en la gráfica 4.7 que muestra la evolución de la apertura de las juntas centrales (3 y 4), la cual se discutirá más adelante en el punto 4.1.1.4.

4.1.1.3 Comportamiento del pretensado

La tensión en el acero de pretensado en los extremos del tendón se obtuvo a partir de las células de carga situadas en las zonas de anclaje, y la tensión en el tramo central entre desviadores se obtuvo a partir de las deformaciones obtenidas de las galgas extensométricas colocadas en los alambres de los tendones de pretensado. En la figura 4.4 y 4.5 se muestra la evolución de la tensión del pretensado en el tendón 1 en todo el trazado y la evolución de deslizamiento en los desviadores respectivamente.

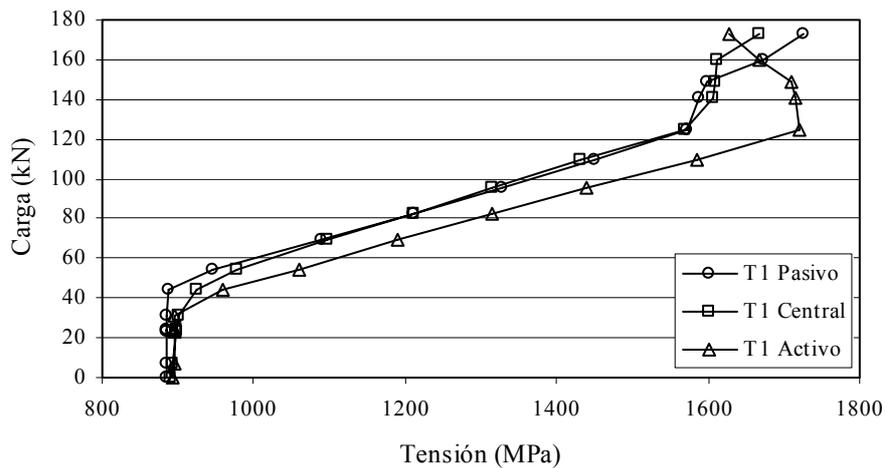


Figura 4.4. Gráfica Carga-Tensión del tendón 1 de la viga VD-TFC1

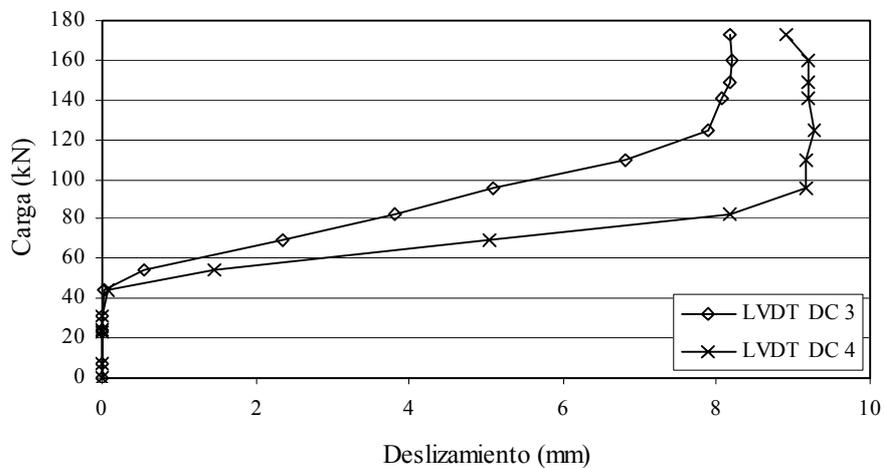


Figura 4.5. Gráfica Carga- Deslizamiento en desviadores de la viga VD-TFC1

Se puede observar la relación existente entre los incrementos de tensión en el pretensado y el deslizamiento de los tendones en los desviadores. Se puede ver una primera fase lineal de comportamiento, en donde tanto el deslizamiento como el incremento de tensión es nulo hasta alcanzar los 40kN de carga aproximadamente, seguida de una fase en la que se presenta un deslizamiento e incremento de tensión uniforme hasta una carga aproximada de 120kN, terminando con una fase irregular correspondiente a la rotura del hormigón en las zonas comprimidas, hasta el final del ensayo.

La diferencia registrada en el LVDT DC 3 y LVDT DC 4, correspondientes a los distintos desviadores de la viga se debe a la reparación de la junta de dovelas dañada. Se puede comprobar que el incremento de tensión en los tendones de pretensado en estados avanzados de carga es muy importante, contraponiéndose con lo conservador de la normativas nacionales e internacionales en relación a este parámetro.

4.1.1.4 Comportamiento del FRP

La figura 4.6 muestra el comportamiento del TFC en una de las juntas de dovelas. La galga GT11 colocada sobre la junta 3 (figura 4.1) y las galgas GT10 y GT12 a 15cm de la junta. Se puede observar la diferencia de deformación entre las galgas, ya que mientras la galga extensométrica colocada en la junta presenta una gran deformación, las galgas situadas a 15cm de la junta apenas presentaron deformación, con lo que se

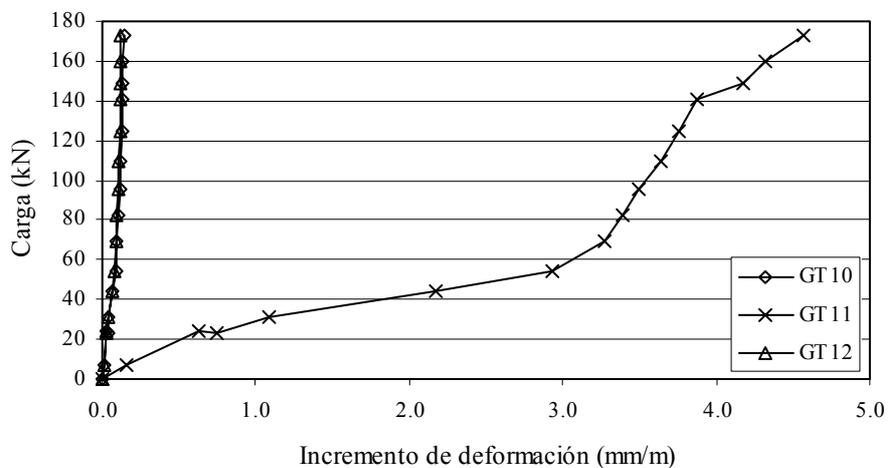


Figura 4.6. Gráfica Carga-Deformación del TFC de la viga VD-TFC1

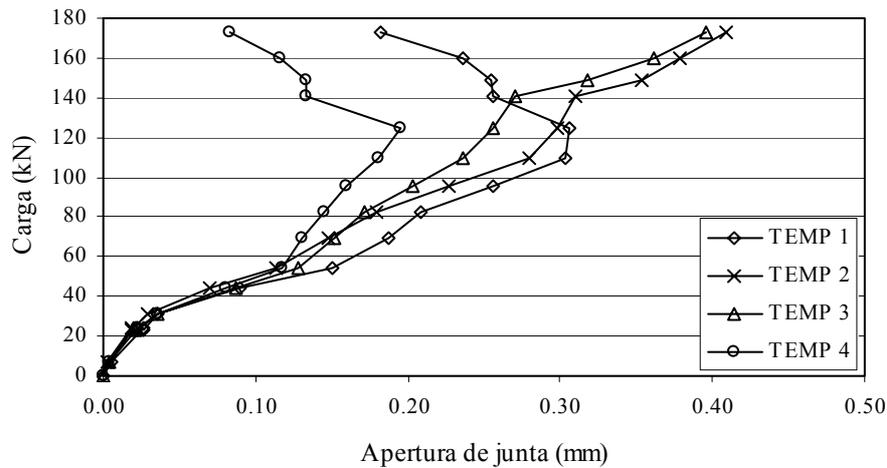


Figura 4.7. Gráfica Carga-Apertura de juntas de la viga VD-TFC1

demuestra que existe una concentración de tensiones importante en la zona próxima a las juntas la cual se analizará y discutirá más adelante en el capítulo 5.

En la figura 4.7 se muestra la evolución de la apertura en las juntas centrales (3 y 4 según la figura 4.1), se observa que debido a la rigidización originada por el TFC apenas se presentó apertura en las juntas centrales. En cambio, la ausencia del TFC en las juntas adyacentes (2 y 5 según la figura 4.1) ocasionó que se presentara una apertura considerable en estas juntas. Lamentablemente, éstas no estaban instrumentadas por lo que no se puede mostrar la evolución de la apertura durante el ensayo. Se puede observar que tanto el temposonic 1 como el 4 colocados en la junta 3, muestran un cambio de comportamiento a una carga aproximada de 120kN, esto se debe a la fisuración de la junta entre dovelas que había sido reparada monolíticamente antes del ensayo, lo que provocó un reacomodo y cambio de comportamiento de la estructura, originando una disminución en la apertura de la junta 3.

4.1.2 VD-TFC2

4.1.2.1 Introducción

Del mismo modo que en el ensayo VD-TFC1, este segundo ensayo se realizó mediante escalones de carga, realizando lecturas de la instrumentación de forma estática, registrando los datos en un archivo que posteriormente fue procesado y analizado.

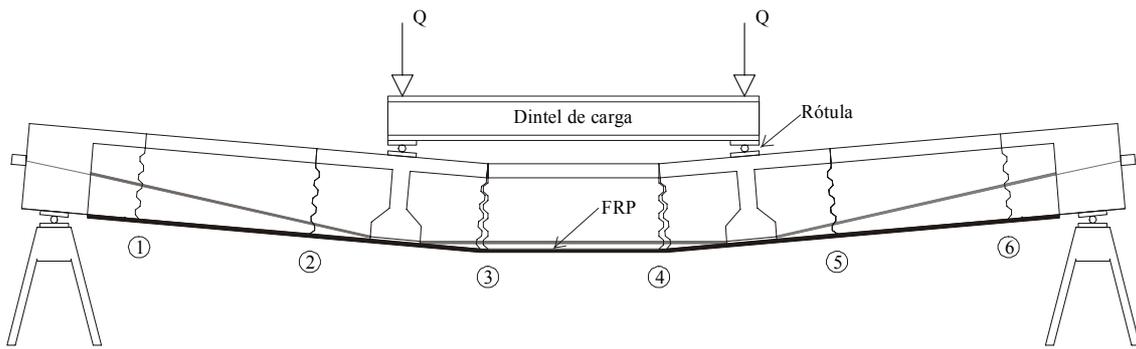


Figura 4.8. Configuración deformada de la viga VD-TFC2

El ensayo se realizó en tres etapas; en la primera etapa se llevó la viga a una carga de 80kN aproximadamente en cada uno de los gatos y después se descargó totalmente. El motivo por el cual se llevó la viga a este nivel de carga se debió al inicio del despegue del TFC, originándose en la zona de las juntas entre dovelas y propagándose gradualmente hacia ambos lados de la junta, produciendo crujidos y desprendimiento de trozos de resina en la zona en la que se producía el despegue. En una segunda etapa se llevó la viga a una carga similar a la de la primera etapa, con el fin de poder comparar el comportamiento de la viga a partir de los datos registrados durante la primera etapa del ensayo. Por último, después de descargarse la viga, se llevó a rotura alcanzando un nivel de carga de 113kN aproximadamente en cada uno de los gatos, produciéndose el despegue total de la fibra de forma explosiva. A primera vista puede resultar confuso, ya que en el ensayo VD-TFC1, la carga a la que se llegó fue superior y no se presentó



Figura 4.9. Desprendimiento del TFC en la viga VD-TFC2

despegue del TFC, pero tomando en cuenta que la fuerza de pretensado se redujo como se menciona y explica en el capítulo 3, ésta carga resulta congruente.

A diferencia del primer ensayo VD-TFC1, al estar unidas por el TFC todas las juntas entre dovelas, la configuración de la deformada coincidió con la esperada, en donde las juntas centrales 3 y 4 abrirían y no las adyacentes como en el primer ensayo. En la figura 4.8 se puede ver un esquema de la viga VD-TFC2 deformada.

El nivel de carga final correspondió al desprendimiento del TFC. La figura 4.9 muestra una fotografía de la viga y el TFC desprendido después del ensayo. Se puede observar el arrancamiento de trozos de hormigón adheridos al TFC, con lo que se verifica que el desprendimiento del FRP no se debió a un fallo en el propio sistema de refuerzo, sino por el contrario, a la fisuración y/o arrancamiento del hormigón a nivel de la interfaz hormigón-FRP.

4.1.2.2 Evolución de la flecha máxima con la carga

La flecha máxima se registró en la dovela central mediante el LVDT colocado al centro del claro. En las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se muestra la evolución de la flecha en cada una de las 3 etapas del ensayo. Se puede observar la diferencia en rigidez de la viga en la primera y segunda etapas antes de que se iniciara el despegue del TFC, por otra parte no existe ninguna diferencia apreciable en cuanto a comportamiento si se compara la segunda y la tercera etapas. Aunque es muy difícil determinar el inicio del despegue del

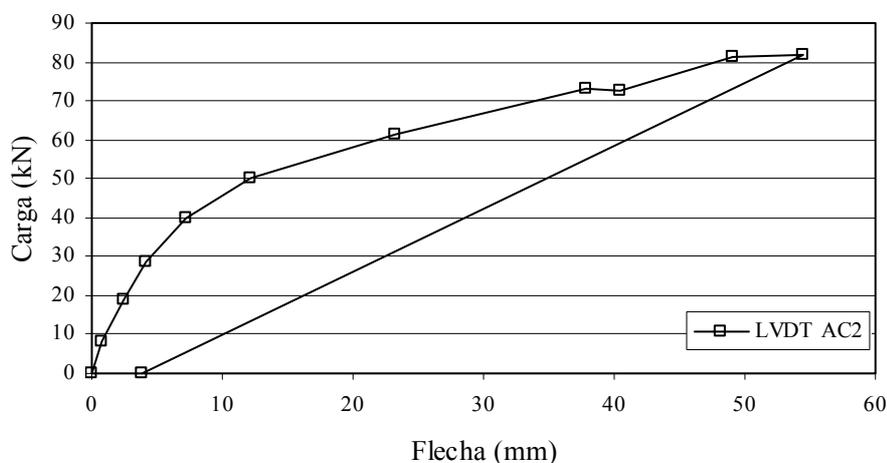


Figura 4.10. Gráfica Carga-Flecha, etapa 1 de la viga VD-TFC2

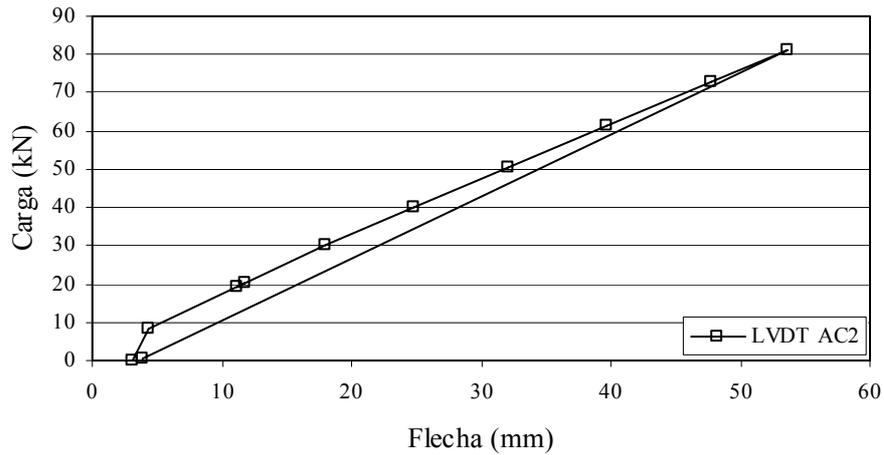


Figura 4.11. Gráfica Carga-Flecha, etapa 2 de la viga VD-TFC2

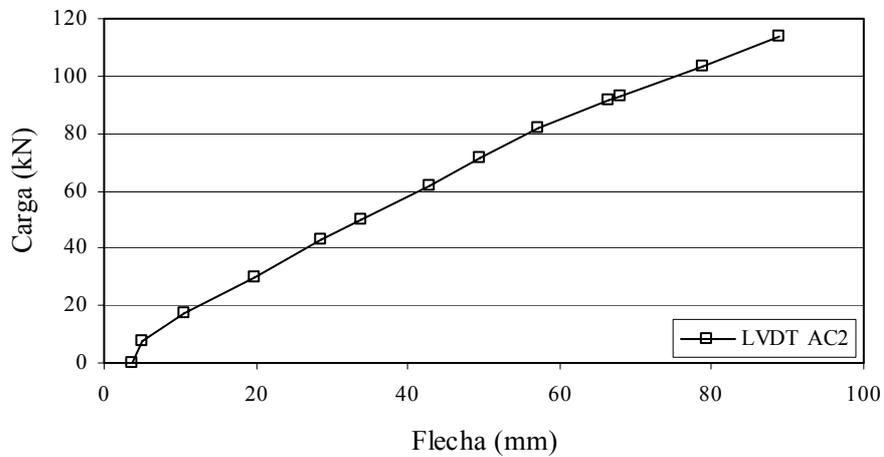


Figura 4.12. Gráfica Carga-Flecha, etapa 3 de la viga VD-TFC2

TFC a partir de esas gráficas, se puede ver un cambio de comportamiento en la primera etapa del ensayo al sobrepasar los 40kN, de cualquier forma más adelante se mostrará el inicio del despegue cuando se analice la deformación registrada en el TFC a lo largo de la superficie de la viga.

4.1.2.3 Comportamiento del pretensado

La tensión en el acero de pretensado en los extremos del tendón se obtuvo a partir de las células de carga situadas en las zonas de anclaje, y la tensión en el tramo central entre desviadores se obtuvo a partir de las deformaciones obtenidas de las galgas extensométricas colocadas en los alambres de los tendones de pretensado. En las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 se muestra la evolución de las tensiones en el pretensado en las tres etapas del ensayo y en las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 la evolución del deslizamiento de los tendones en los desviadores.

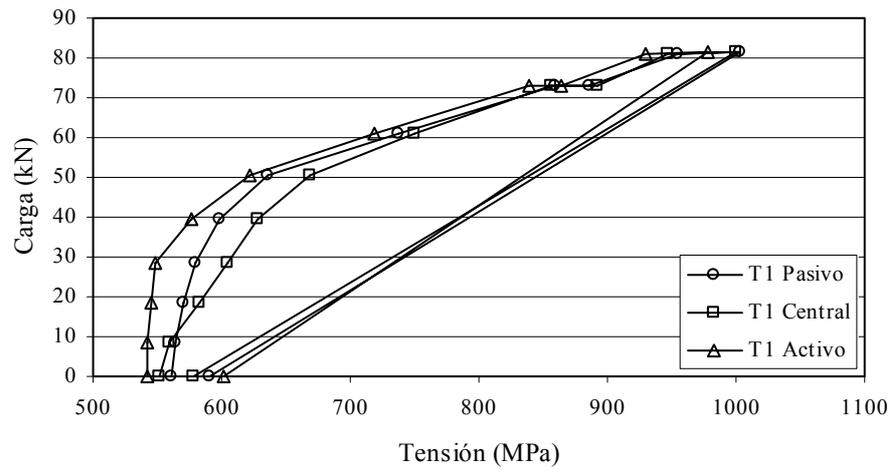


Figura 4.13. Gráfica Carga-Tensión, etapa 1 de la viga VD-TFC2

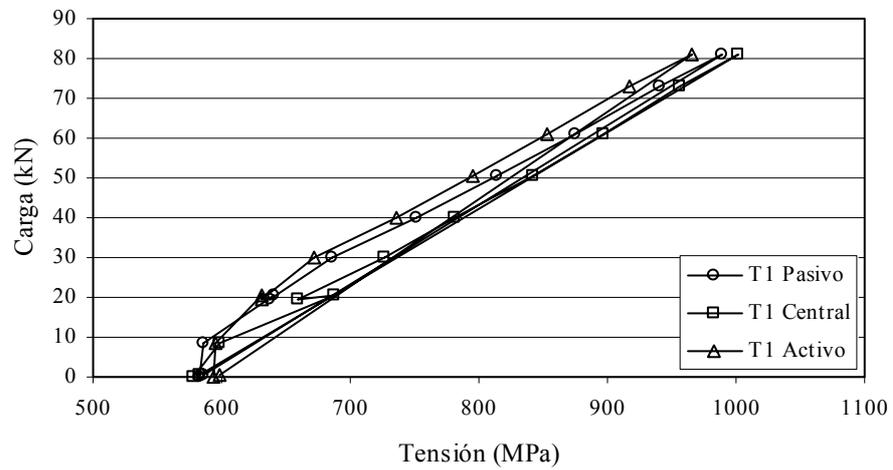


Figura 4.14. Gráfica Carga-Tensión, etapa 2 de la viga VD-TFC2

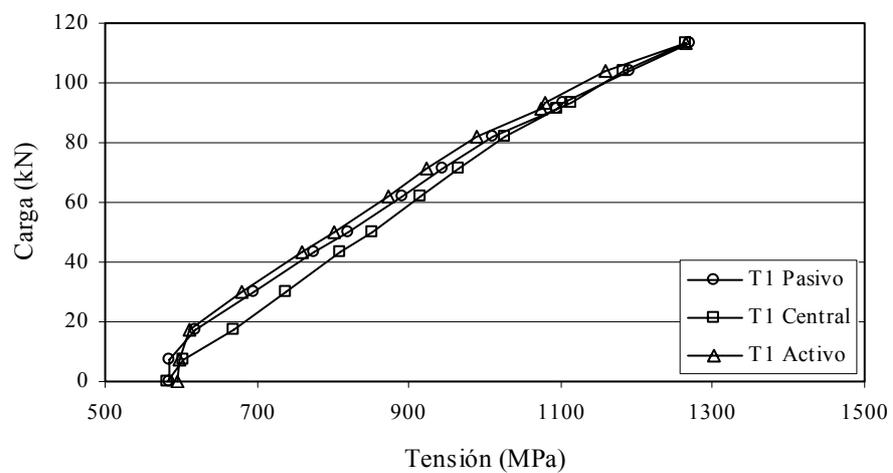


Figura 4.15. Gráfica Carga-Tensión, etapa 3 de la viga VD-TFC2

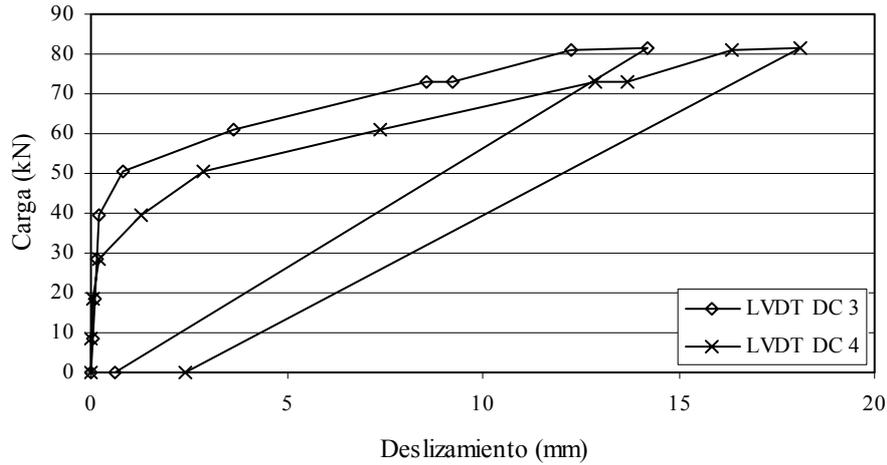


Figura 4.16. Gráfica Carga-Deslizamiento, etapa 1 de la viga VD-TFC2

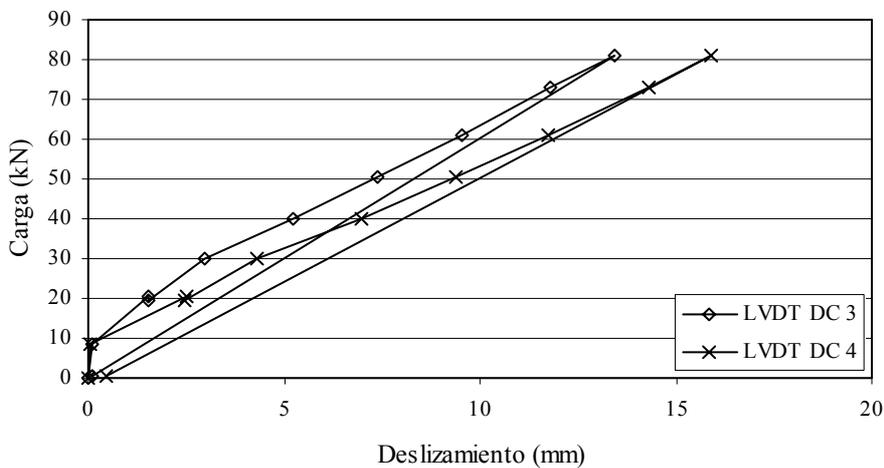


Figura 4.17. Gráfica Carga-Deslizamiento, etapa 2 de la viga VD-TFC2

Se puede observar en este ensayo a partir de las gráficas correspondientes a la primera y segunda etapas la relación clara que hay entre el deslizamiento de los tendones en los desviadores y los incrementos de tensión en el pretensado. Se observa que en la primera etapa del ensayo no se da un incremento de tensiones importante hasta pasar los 40kN, correspondientes al inicio del deslizamiento del tendón respecto a los desviadores, en las etapas posteriores el deslizamiento de los tendones presentan una ley prácticamente lineal a partir de los 10kN, contrastando con el comportamiento de las tensiones en el pretensado.

A partir de los resultados obtenidos en las diferentes etapas de este ensayo, se puede constatar que el TFC contribuye a un aumento importante de rigidez en niveles bajos de carga, limitando esta contribución al inicio de despegue del TFC, pudiendo simular al

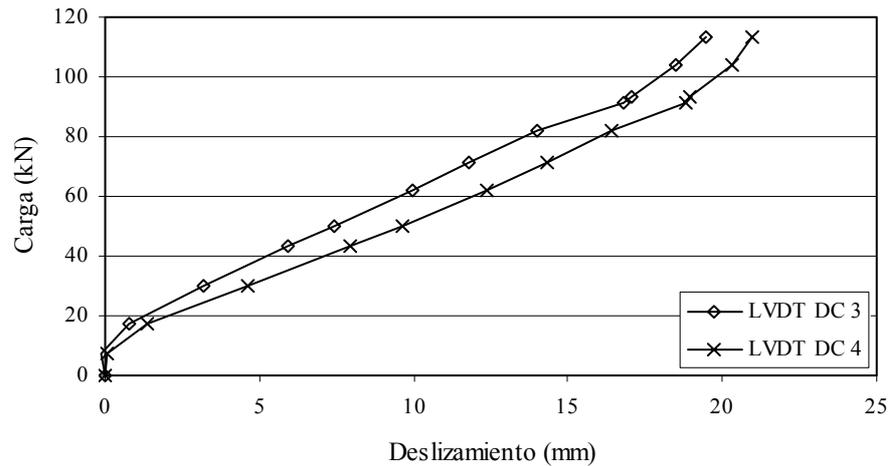


Figura 4.18. Gráfica Carga-Deslizamiento, etapa 3 de la viga VD-TFC2

TFC una vez iniciado el despegue, hipotéticamente como un cable anclado en sus extremos.

4.1.2.4 Comportamiento del FRP

Las figuras 4.19, 4.20 y 4.21 muestran el comportamiento del TFC en una de las juntas de dovelas durante las tres etapas del ensayo. La galga GT5 colocada sobre la junta 4 (figura 4.8) y las galgas GT4 y GT6 a 15cm de la junta. En la primera etapa del ensayo se puede observar claramente el momento en que ocurre el despegue del TFC hacia ambos lados de la junta. Mientras la galga GT5 muestra un comportamiento sin cambios súbitos de pendiente hasta prácticamente el final, las galgas GT4 y GT6 cambian su comportamiento de manera drástica entre 40kN y 50kN de carga.

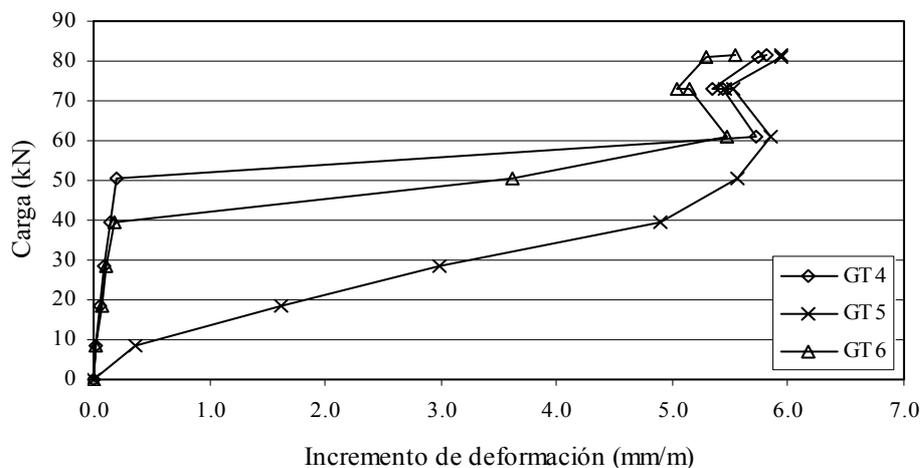


Figura 4.19. Gráfica Carga-Deformación del TCF, etapa 1 de la viga VD-TFC2

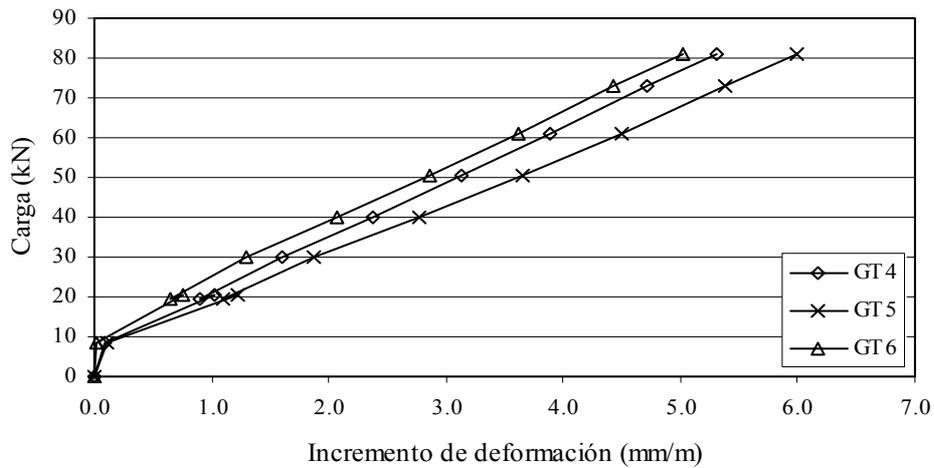


Figura 4.20. Gráfica Carga-Deformación del TCF, etapa 2 de la viga VD-TFC2

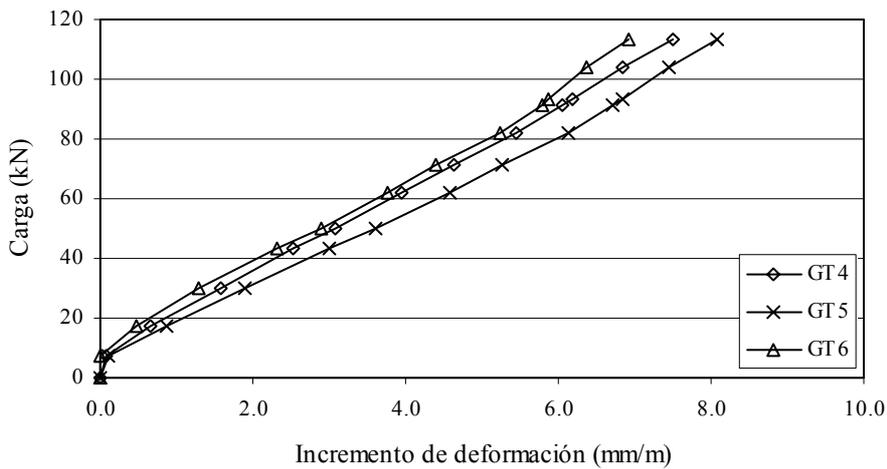


Figura 4.21. Gráfica Carga-Deformación del TCF, etapa 3 de la viga VD-TFC2

En contraste, se puede observar la deformación registrada por las galgas en las dos etapas siguientes, constatando el desprendimiento del TFC en una zona importante alrededor de las juntas entre dovelas, pues se puede observar la concordancia en deformación de las tres galgas con lo que se puede comprobar la hipótesis hecha de que el TFC a partir de la segunda etapa se comporta como un cable anclado en los extremos en las zonas de anclaje. Este mismo comportamiento se pudo observar en el resto de las galgas colocadas a lo largo del TFC.

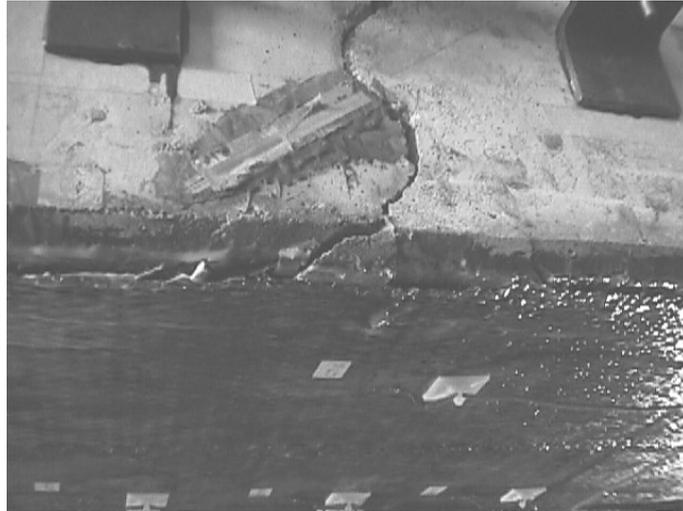


Figura 4.22. Detalle de la interfaz hormigón/TFC después de la primera etapa de la viga VD-TFC2

No solamente se pudo registrar el desprendimiento del TFC a través de la instrumentación de la viga, sino que al descargarla tras la primera etapa del ensayo, se pudo constatar claramente este fenómeno al observar la interfaz hormigón / TFC, como se muestra en la figura 4.22.

Del mismo modo que en el TFC, se puede ver el cambio de comportamiento en cuanto a la evolución de la apertura de las juntas en las tres etapas. Este comportamiento se ve reflejado en las figuras 4.23, 4.24 y 4.25.

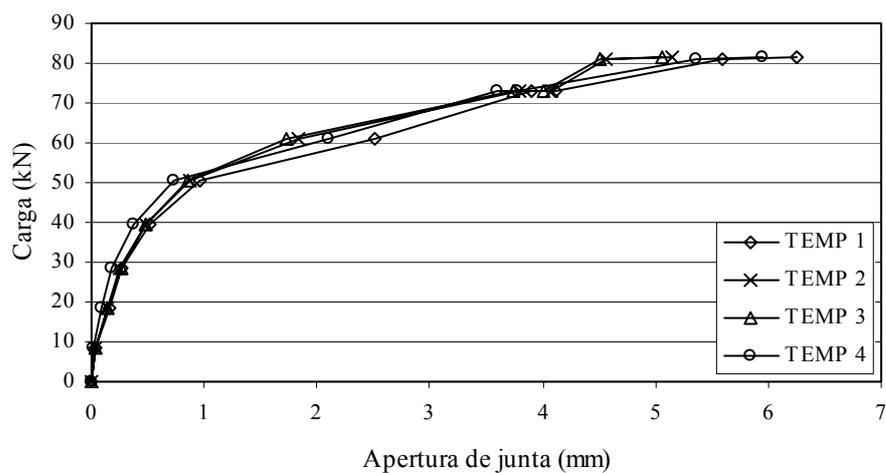


Figura 4.23. Gráfica Carga-Apertura de junta etapa 1 de la viga VD-TFC2

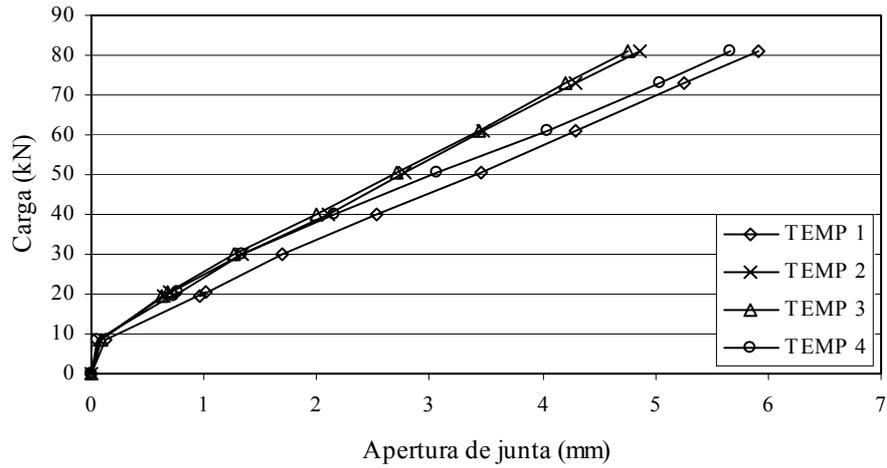


Figura 4.24. Gráfica Carga-Apertura de junta etapa 2 de la viga VD-TFC2

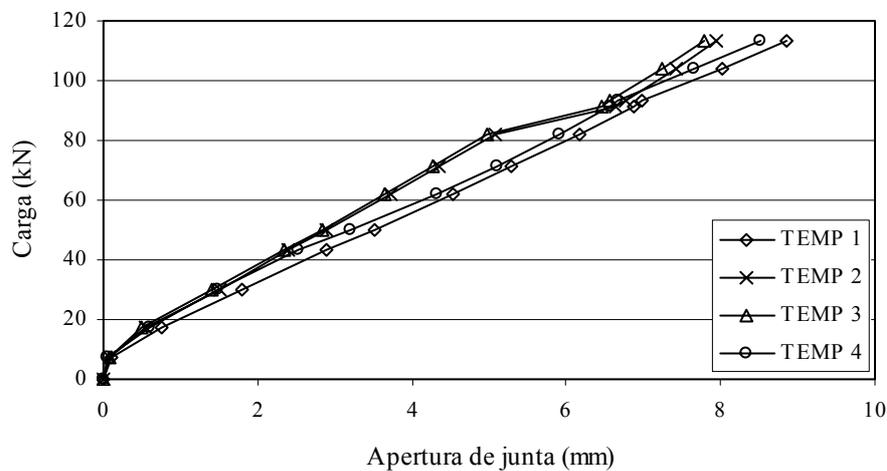


Figura 4.25. Gráfica Carga-Apertura de junta etapa 3 de la viga VD-TFC2

El mecanismo de rotura se inició con una fisura diagonal localizada en la zona próxima a la junta de dovelas (figura 4.26 izquierda), propagándose a través de la interfaz hormigón / TFC causando el despegue de la fibra por el proceso denominado “peeling”.

En la figura 4.26 derecha se puede observar el desprendimiento del hormigón en la zona de juntas entre dovelas hasta el acero pasivo, motivo por el cual se originó una fisura longitudinal que se propagó a través de la interfaz hormigón / TFC.

4.1.3 VD-CFK1

4.1.3.1 Introducción

Del mismo modo que en los ensayos VD-TFC1 y VD-TFC2, este tercer ensayo se realizó mediante escalones de carga, realizando lecturas de la instrumentación de forma



Figura 4.26. Detalle del despegue del TFC en la viga VD-TFC2; (Izq.) Fisuración inicial en la junta; (Der.) Desprendimiento del TFC.

estática, registrando los datos en un archivo que posteriormente fue procesado y analizado.

El ensayo se realizó en una sola etapa, llevando la viga al desprendimiento del CFK. En este ensayo el despegue del CFK fue gradual, a diferencia del ensayo VD-TFC2, por lo que se alcanzó una carga máxima de 96kN en cada uno de los gatos, para después registrar una disminución paulatina de la rigidez del sistema y disminución de carga al ir aumentando el área de despegue del CFK.

La deformación observada en la viga VD-CFK1 fue similar a la que se presentó en el ensayo de la viga VD-TFC2. En la figura 4.27 se puede ver un esquema de la viga VD-CFK1 deformada.

Como se mencionó anteriormente el despegue del CFK se presentó gradualmente desde la zona próxima a las juntas entre dovelas centrales hacia ambos lados de estas.

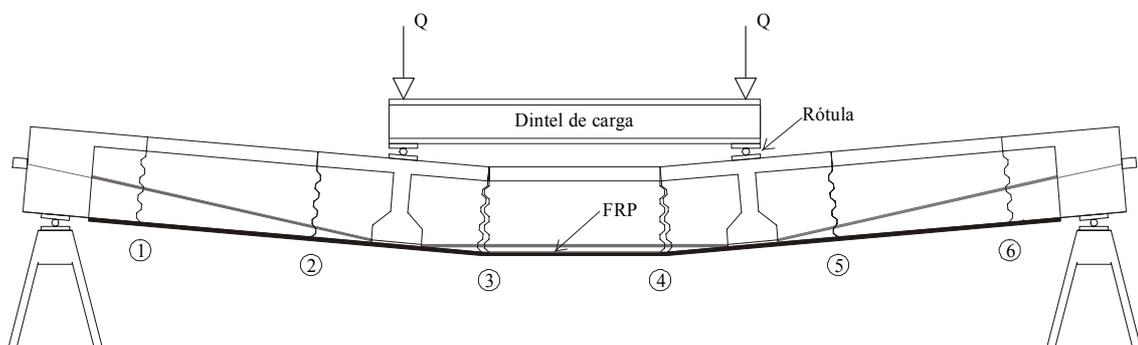


Figura 4.27. Configuración deformada de la viga VD-CFK1



Figura 4.28. Detalle de la junta central entre dovelas después del ensayo VD-CFK1

Quizá la mejor descripción de los ensayos en la viga VD-CFK1 lo representan las fotografías tomadas después del ensayo, en donde se observa claramente el desprendimiento de FRP hacia ambos lados de la junta, descartando el fenómeno de falla de despegue por descenso diferencial entre labios de fisuras registrado por varios investigadores [BUYUKOZTURK & HEARING, 1998] y obteniendo un tipo de falla diferente. La figura 4.28 muestra el detalle de la junta de dovelas de la viga VD-CFK1 después del ensayo. Se puede observar el laminado de fibra de carbono desprendido alrededor de la junta entre dovelas.

4.1.3.2 Evolución de la flecha máxima con la carga

La flecha máxima se registró en la dovela central mediante el LVDT colocado en el centro del vano. En la figura 4.29 se muestra la evolución de la flecha respecto a la carga.

Se puede observar en esta figura como a partir de cuando inicia el despegue con una carga aproximada de 70kN prácticamente la carga no tiene variaciones importantes, continuando así hasta el desprendimiento del laminado en donde se presenta súbitamente un descenso de la carga y después un endurecimiento posiblemente causado por el incremento de tensión en el pretensado a estados avanzados de carga. Se presenta al principio una rama elástica prácticamente lineal hasta una carga de 70kN

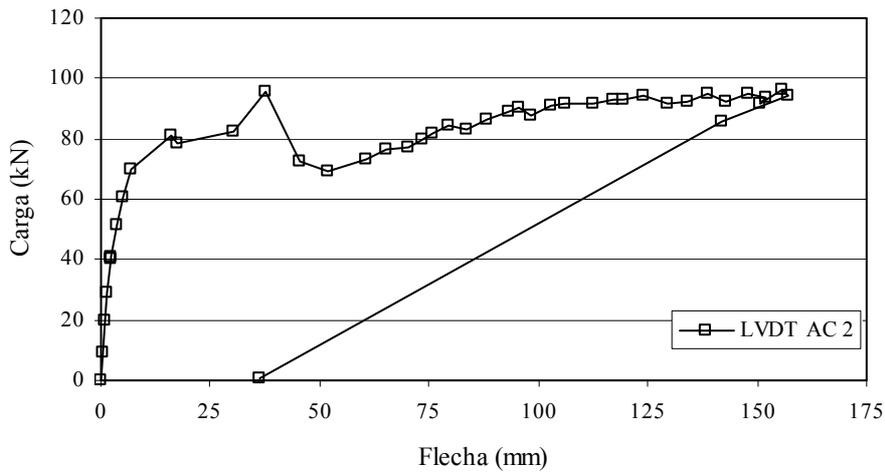


Figura 4.29. Gráfica Carga-Flecha de la viga VD-CFK1

aproximadamente seguida de una etapa con cambios drásticos producidos por el despegue gradual del CFK y continuando con una rama con tendencia asintótica en donde se puede suponer nula la contribución del FRP.

4.1.3.3 Comportamiento del pretensado

La tensión en el acero de pretensado en los extremos del tendón se obtuvo a partir de las células de carga situadas en las zonas de anclaje, y la tensión en el tramo central entre desviadores se obtuvo a partir de las deformaciones obtenidas de las galgas extensométricas colocadas en los alambres de los tendones de pretensado al igual que en los ensayos anteriores.

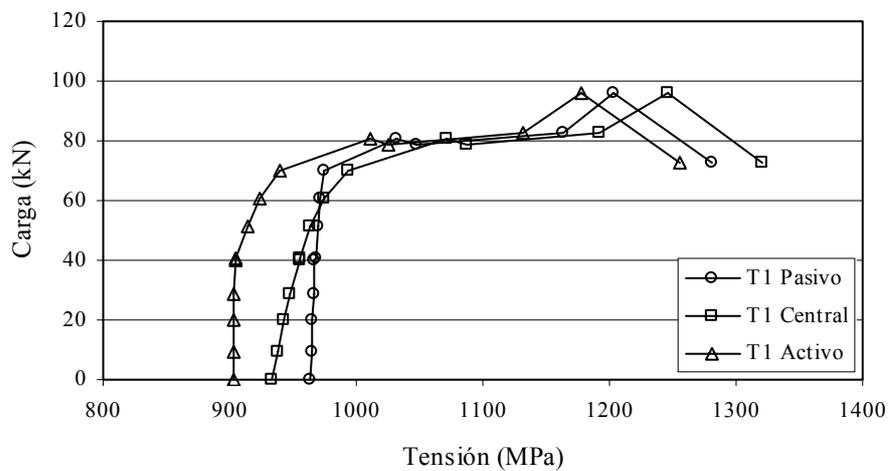


Figura 4.30. Gráfica Carga-Tensión del tendón 1 de la viga VD-CFK1

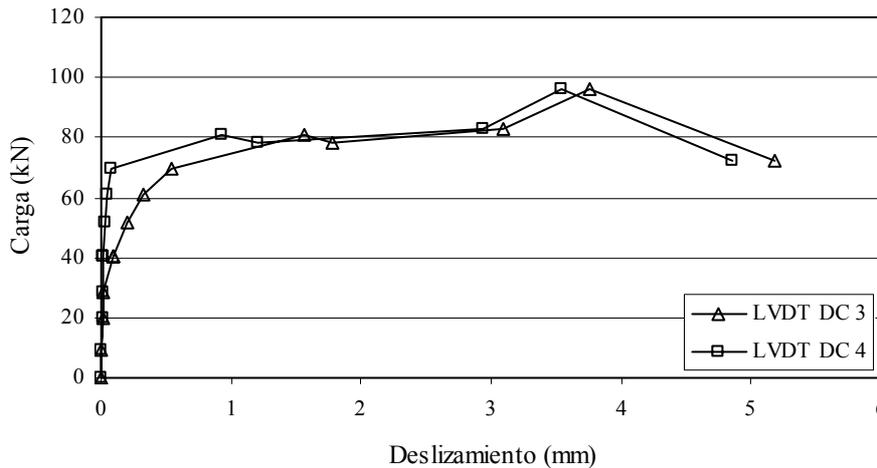


Figura 4.31. Gráfica Carga-Deslizamiento en desviadores de la viga VD-CFK1.

En las figuras 4.30 y 4.31 se muestra la evolución de la tensión del pretensado en el tendón 1 en todo el trazado y la evolución de los deslizamientos de los tendones en los desviadores respectivamente, desde el inicio del ensayo hasta el desprendimiento del CFK.

La relación entre los incrementos de tensión en el pretensado y el deslizamiento de los tendones en los desviadores es obvia, se puede observar claramente la inhibición de deslizamiento de los tendones de pretensado antes de que se inicie el despegue del FRP, pudiendo plantear la hipótesis de que el refuerzo de FRP aumenta la rigidez del sistema y que esta rigidez influye directamente en el deslizamiento de los tendones y por consecuencia en el incremento de tensión en el pretensado, argumentando por esto que la geometría de deformación tiene una influencia determinante en la magnitud del incremento de la tensión de pretensado en estructuras con pretensado exterior.

4.1.3.4 Comportamiento del FRP

La figura 4.32 muestra el comportamiento del CFK en una de las juntas de dovelas. La galga GC2 colocada sobre la junta 3 (figura 4.27) y las galgas GC1 y GC3 a 15cm de la junta. Al igual que en la primera etapa del ensayo VD-TFC2 se puede observar la diferencia de deformación entre las galgas, ya que al principio mientras la galga extensométrica colocada sobre la junta presenta una gran deformación, las galgas situadas a 15cm de la junta apenas presentaron deformación, hasta despegar el CFK debajo de la galga.

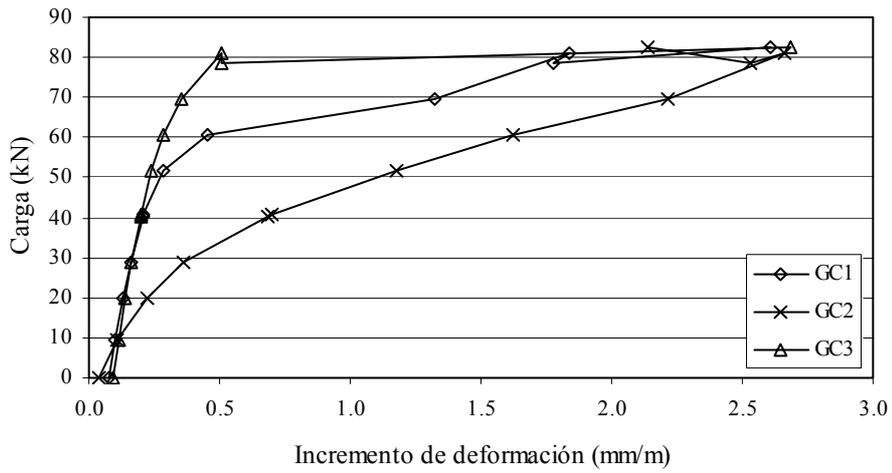


Figura 4.32. Gráfica Carga-Deformación del CFK de la viga VD-CFK1

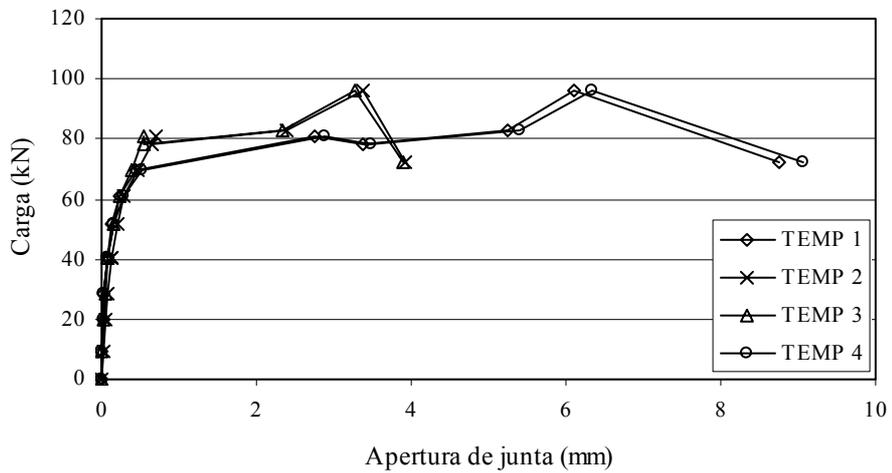


Figura 4.33. Gráfica Carga-Apertura de juntas de la viga VD-CFK1

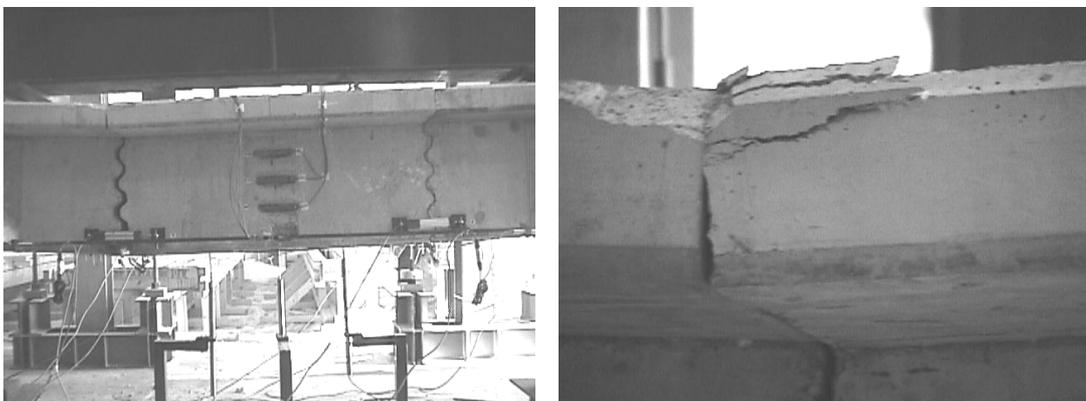


Figura 4.34. Ensayo de la viga VD-CFK1; (Izq.) Detalle de las juntas centrales abiertas; (Der.) Detalle de zona superior de la junta 3.



Figura 4.35. Detalle del desprendimiento del CFK en la viga VD-CFK1.

Se puede observar claramente el momento en que ocurre el despegue del CFK hacia ambos lados de la junta y como la deformación registrada en las galgas tiende a igualarse debido al fenómeno de desprendimiento gradual.

Del mismo modo que en los dos ensayos anteriormente expuestos, se muestra en la figura 4.33 la apertura de las juntas centrales de la viga, pudiéndose observar una diferencia marcada entre ambas juntas, debida al aplastamiento del hormigón en la parte superior de la junta como se puede observar en la figura 4.34, aunado a la aparición asimétrica del “peeling” en ambos lados de la viga (sentido longitudinal).

Al igual que en la viga VD-TFC2, el mecanismo de rotura se inició con una fisura diagonal localizada en la zona próxima a la junta entre dovelas, propagándose a través de la interfaz hormigón / CFK causando el despegue de la fibra por el proceso denominado “peeling”.

En la figura 4.35 se puede observar el desprendimiento del hormigón en la zona de juntas entre dovelas hasta el acero pasivo, motivo por el cual se originó una fisura longitudinal que se propagó a través de la interfaz hormigón / CFK.

4.2 Ensayos de Adherencia

Los ensayos de adherencia fueron concebidos y diseñados para poder observar y explorar en un medio controlado los procesos observados en las vigas de dovelas, por lo

que la atención principal de este tipo de ensayos se centra en la deformación registrada en los diferentes FRPs y no en la flecha registrada por el LVDT del pistón de la prensa, tratando de establecer un vínculo entre la deformación del FRP y el proceso de desprendimiento “peeling”.

A diferencia de las vigas de dovelas en donde se trataron los ensayos individualmente describiendo cada uno de ellos, los ensayos de adherencia se tratarán globalmente, describiendo las particularidades de los ensayos a partir de la información generada por el conjunto de probetas, ya que no tiene caso tratar cada ensayo individualmente cayendo en una redundancia innecesaria que no aportaría nada nuevo al trabajo de investigación. De cualquier forma toda la información generada por los ensayos realizados con las probetas de adherencia se recoge en el Anejo B.

Como se comentó en el capítulo 3, en un principio se intentó controlar el ensayo por medio de un clip conectado a la prensa, con el fin de mantener un desplazamiento relativo entre bloques constante y tratar de captar el comportamiento en rotura de las probetas con mayor precisión y detalle. En la figura 4.36 se muestra la colocación de dicho clip. Sin embargo, los primeros ensayos realizados utilizando el clip como instrumento de control no dieron los resultados esperados debido a la aparición de fisuras en el hormigón durante el ensayo, lo que ocasionó que el desplazamiento entre bloques no fuera real, por lo que se tomó la decisión de retirar el clip y cambiar el control del ensayo a desplazamiento del pistón de la prensa.



Figura 4.36. Ensayos de adherencia serie 1; (Izq.) Vista global del ensayo; (Der.) Detalle del clip en la zona central inferior de la probeta.

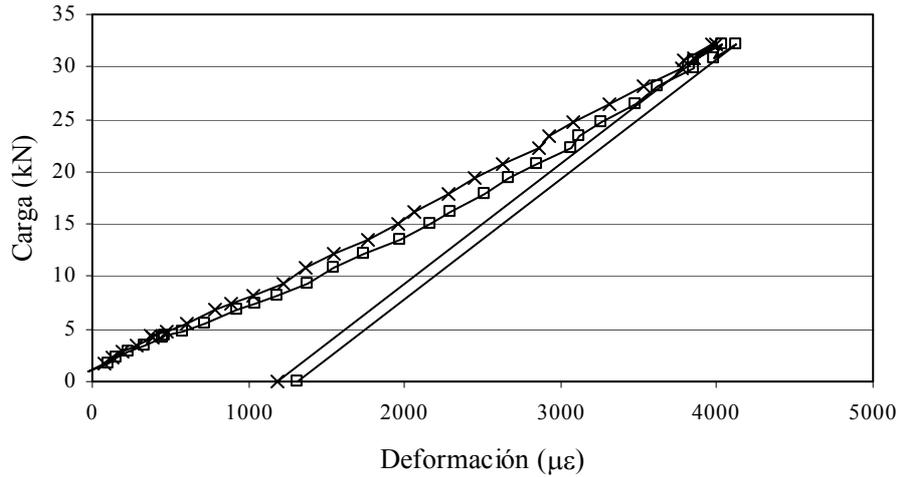


Figura 4.37. Gráfica Carga-Deformación del TFC de la probeta TFC1-2.

En la primera serie de ensayos únicamente se colocaron dos galgas extensométricas en el centro del FRP con el fin de registrar la deformación en la zona central, ya que como nunca se habían realizado ensayos de este tipo con FRPs existía cierta incertidumbre respecto a su fiabilidad y comportamiento. En las figuras 4.37 y 4.38 se muestra la evolución de deformaciones del TFC y el CFK respectivamente. Se puede observar como el comportamiento del CFK es mucho más lineal que el TFC debido a la naturaleza de fabricación del FRP, ya que mientras el TFC es un tejido bidireccional fabricado in-situ mediante el proceso denominado “wet-layup”, el espesor de resina del compuesto no es constante, además de presentar heterogeneidad en la superficie por ser un tejido. Por otro lado, el CFK al ser un laminado preimpregnado de resina, su comportamiento es mucho más homogéneo. Otro de los aspectos que pueden observarse

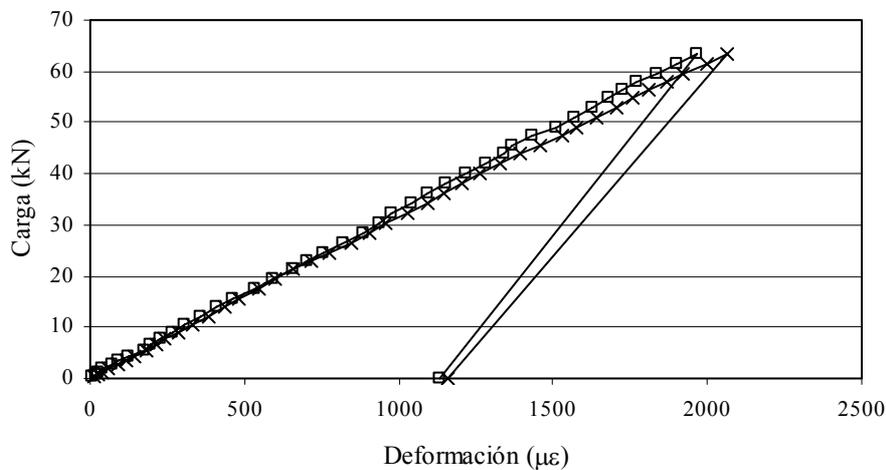


Figura 4.38. Gráfica Carga-Deformación del CFK de la probeta CFK1-1.

es la diferencia de rigidez entre ambos sistemas de refuerzo, al calcular el módulo de elasticidad indirectamente a partir de la tensión y deformación máximas del FRP. Los módulos de elasticidad obtenidos para los ensayos TFC1-2 y CFK1-1 son 108 y 163GPa, los cuáles son muy similares a los proporcionados por los fabricantes (105 y 150GPa). Cabe mencionar que para calcular las tensiones en el TFC se utilizó el espesor del FRP proporcionado por el fabricante equivalente a 0.43mm, lo que en realidad es muy difícil de precisar debido al proceso de fabricación artesanal.

Las deformaciones máximas obtenidas en este tipo de ensayo distan mucho de las proporcionadas por los fabricantes para su diseño y obtenidos a través de un ensayo de tracción directa, ya que mientras en estos ensayos se obtuvieron deformaciones máximas promedio para el TFC y CFK de 0.45% y 0.25% respectivamente, las deformaciones de diseño proporcionadas por los fabricantes son 1% para el TFC y de 0.6 a 0.8% para el CFK. En la tabla 4.1 se muestran las cargas máximas Q_{max} y la deformación máxima del FRP al momento de rotura ε_{uf} de los ensayos en las probetas de adherencia.

Tabla 4.1. Resultados de los ensayos de adherencia

Probeta	Q_{max} (kN)	ε_{uf} ($\mu\varepsilon$)
TFC1-1	35.0	-
TFC1-2	33.3	4000
TFC1-3	39.3	-
TFC1-4	35.9	-
TFC2-1	30.8	4200
TFC2-2	39.9	3900
TFC2-3	39.2	4900
TFC2-4	39.2	5000
CFK1-1	63.4	2000
CFK1-2	64.3	2200
CFK1-3	58.2	1900
CFK1-4	66.7	2400
CFK2-1	64.8	2700
CFK2-2	72.1	2700
CFK2-3	63.3	2400
CFK2-4	62.5	2500

En las probetas TFC1-1, TFC1-3 y TFC1-4 no se muestra el valor de la deformación máxima debido a que estas dos probetas fueron controladas con el clip y solamente fue



Figura 4.39. Detalle de la fisuración en la zona central de las probetas de adherencia.

posible registrar la carga máxima debido a los problemas que se han mencionado anteriormente respecto a este tipo de control de ensayo.

El mecanismo de rotura observado en estos ensayos coincidió con el que se presentó en las vigas de dovelas, conocido con el nombre de “peeling”. El proceso comienza cuando la concentración de esfuerzos en el centro de la probeta hace que se generen empujes al vacío en el hormigón en la zona próxima a la junta, produciendo en un principio fisuras diagonales en el hormigón (Figura 4.39), ocasionando un desprendimiento de éste y propagando la fisura hacia ambos lados a través de la interfaz hormigón-FRP, produciendo el despegue del FRP (Figura 40).

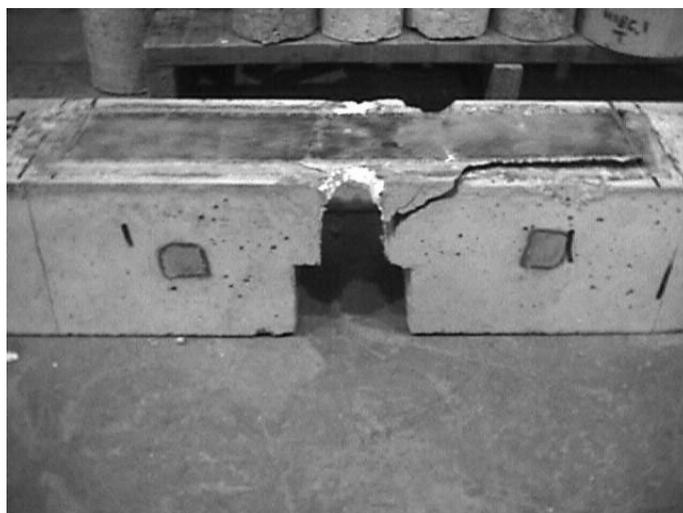


Figura 4.40. Probeta de adherencia después del ensayo.

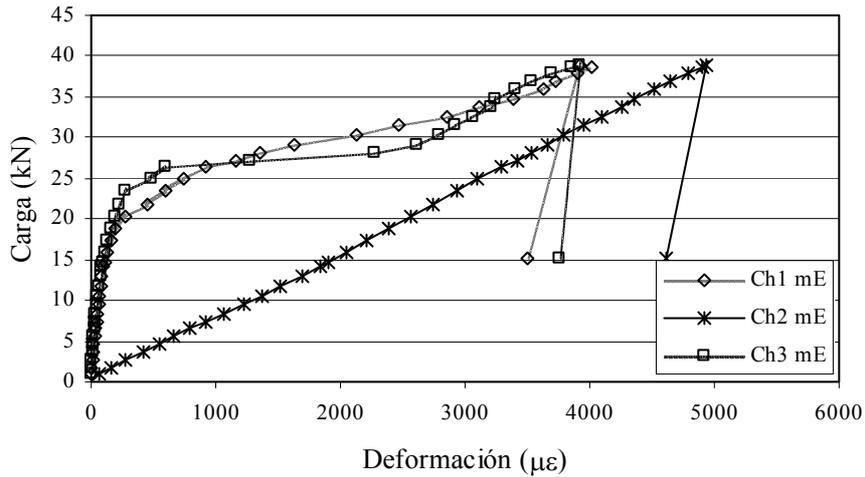


Figura 4.41. Gráfica Carga-Deformación del TFC de la probeta TFC2-3.

En la segunda serie de ensayos de adherencia se pudo registrar el despegue del FRP gracias a las galgas extensométricas colocadas a 10cm del centro, como se observa en las figuras 4.41 y 4.42 en donde se muestra la evolución de la deformación en el TFC y CFK respectivamente.

La galga Ch2 colocada en el centro registró la deformación máxima del FRP, mientras que las galgas Ch1 y Ch3 colocadas a 5cm del borde interno del bloque de hormigón desvelaron el momento en el que se inició el despegue del FRP en las probetas produciendo un cambio de pendiente con la misma tendencia que la galga central. La deformación aproximada registrada al inicio del despegue para las probetas reforzadas con TFC y CFK fue de 400 y 450 $\mu\epsilon$ respectivamente.

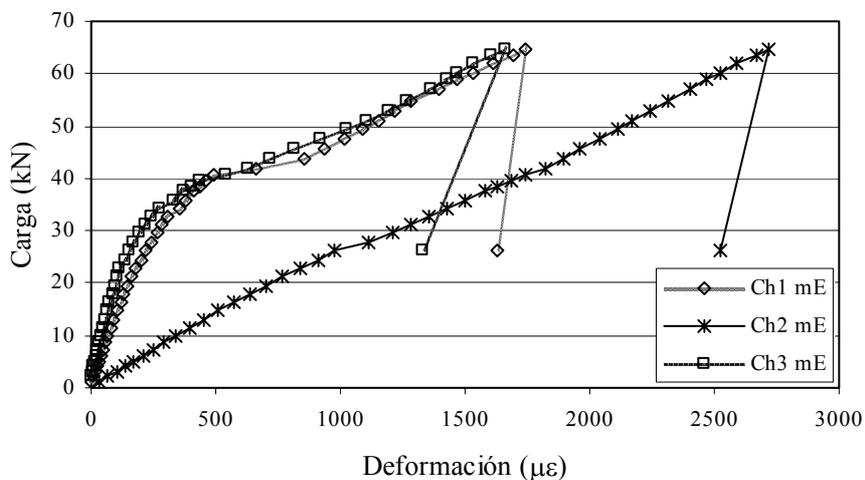


Figura 4.42. Gráfica Carga-Deformación del CFK de la probeta CFK2-1.

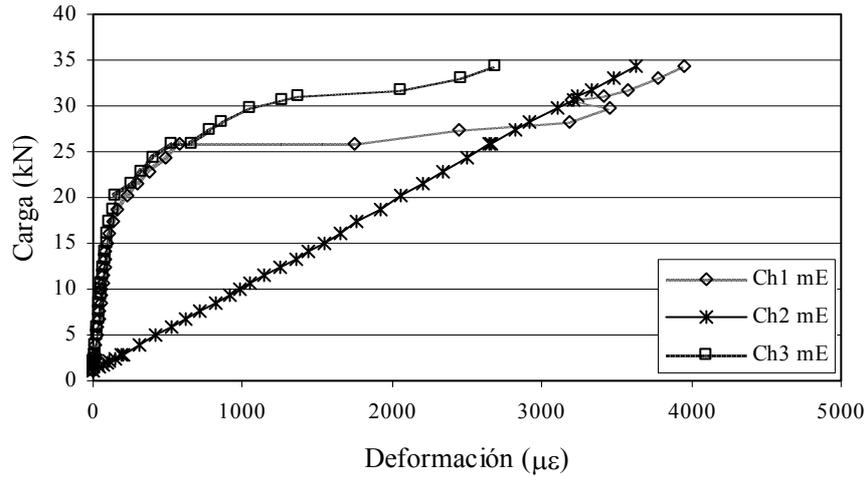


Figura 4.43. Gráfica Carga-Deformación del TFC, etapa 1 de la probeta TFC2-2.

En la probeta TFC2-2 se utilizó una metodología diferente de carga, ya que se llevó a una carga de 34kN y después se descargó, posteriormente se llevó a rotura a una carga aproximada de 40kN. El comportamiento registrado en esta probeta fue muy similar al obtenido en la viga VD-TFC2, en donde el FRP en la segunda etapa, una vez despegado en la zona instrumentada, trabajaba como un cable anclado en los extremos, sin presentar diferencias significativas de deformación entre la galga central y las galgas adyacentes. En las figuras 4.43 y 4.44 se muestran las dos etapas de este ensayo.

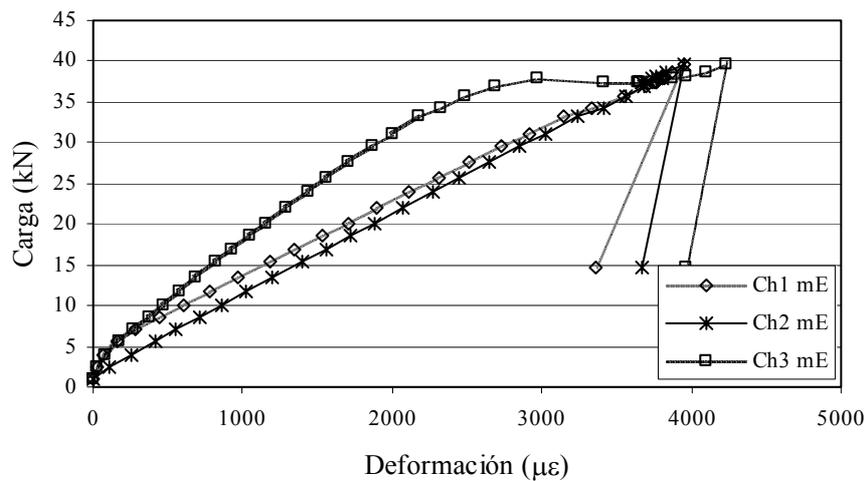


Figura 4.44. Gráfica Carga-Deformación del TFC, etapa 2 de la probeta TFC2-2.

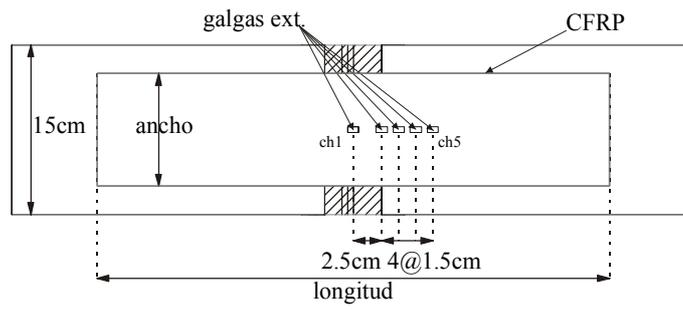


Figura 4.45. Colocación de las galgas extensométricas en los ensayo CFK2-2 y CFK2-4.

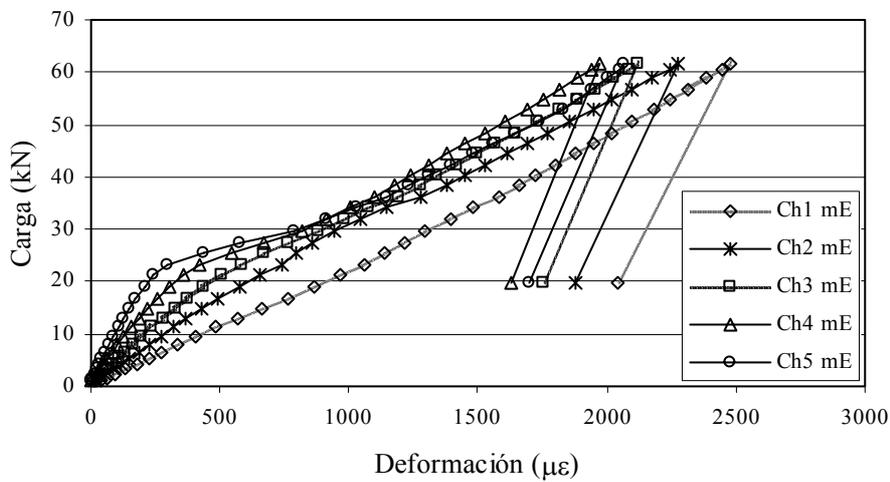


Figura 4.46. Gráfica Carga-Deformación del CFK de la probeta CFK2-4.

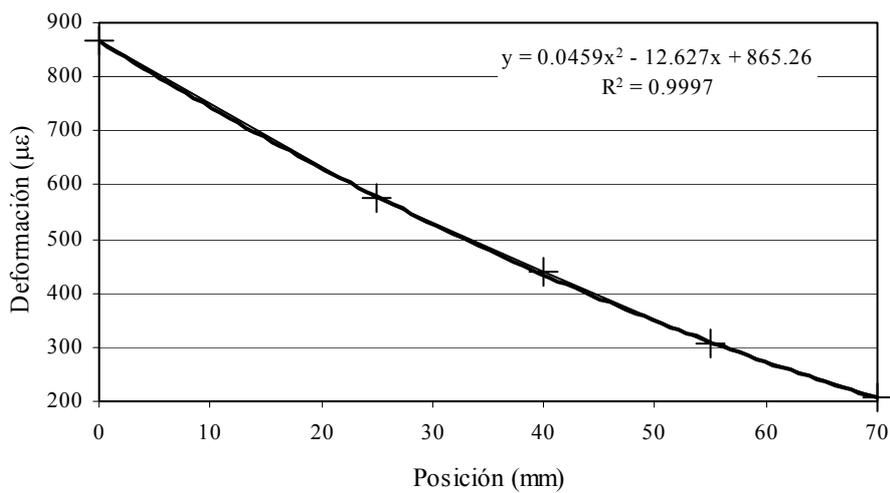


Figura 4.47. Deformaciones en el CFK a partir del centro para una carga de 20kN, probeta CFK2-2.

Como se mencionó en el capítulo 3, para las probetas CFK2-2 y CFK2-4 se utilizó una instrumentación diferente, con el propósito de tratar de registrar la distribución de tensiones tangenciales próxima a la junta. En la figura 4.46 se muestra la evolución de las deformaciones en el ensayo CFK2-4, en donde la galga Ch1 está colocada al centro de la probeta, la galga Ch2 a 2.5cm del centro y las galgas Ch3, Ch4 y Ch5 separadas a 1.5cm una de otra como se muestra en la figura 4.45.

Tabla 4.2. Resumen de resultados y datos estadísticos de los ensayos de adherencia.

TFC					
Probeta	Serie 1		Probeta	Serie 2	
	f_{yu} (MPa)	ε_{uf} (με)		f_{yu} (MPa)	ε_{uf} (με)
TFC1-1	466.5	-	TFC2-1	473.6	4200
TFC1-2	433.7	-	TFC2-2	548.1	3900
TFC1-3	-	-	TFC2-3	536.3	4900
TFC1-4	-	-	TFC2-4	541.0	5000
<i>Promedio</i>	<i>450.1</i>	<i>-</i>	<i>Promedio</i>	<i>524.8</i>	<i>4500</i>
<i>D. Estándar</i>	<i>23.1</i>	<i>-</i>	<i>D. Estándar</i>	<i>34.4</i>	<i>535</i>
<i>Varianza</i>	<i>5%</i>	<i>-</i>	<i>Varianza</i>	<i>7%</i>	<i>12%</i>

CFK					
Probeta	Serie 1		Probeta	Serie 2	
	f_{yu} (MPa)	ε_{uf} (με)		f_{yu} (MPa)	ε_{uf} (με)
CFK1-1	329.5	2000	CFK2-1	353.8	2700
CFK1-2	334.8	2200	CFK2-2	376.7	2700
CFK1-3	299.8	1900	CFK2-3	336.3	2400
CFK1-4	344.8	2400	CFK2-4	328.8	2500
<i>Promedio</i>	<i>327.2</i>	<i>2125</i>	<i>Promedio</i>	<i>348.9</i>	<i>2575</i>
<i>D. Estándar</i>	<i>19.3</i>	<i>221</i>	<i>D. Estándar</i>	<i>21.2</i>	<i>150</i>
<i>Varianza</i>	<i>6%</i>	<i>10%</i>	<i>Varianza</i>	<i>6%</i>	<i>6%</i>

f_{yu} es la tensión máxima registrada en el ensayo

ε_{uf} es la deformación de despegue registrada en los ensayos

Para poder determinar la distribución de tensiones es necesario analizar las deformaciones registradas en las galgas dentro de la rama que muestra un comportamiento elástico lineal, por esto se ha seleccionado una carga de 20kN, en donde las 5 galgas muestran un comportamiento lineal (Figura 4.46), por lo que se puede suponer que no había comenzado el “peeling” en este punto. En la figura 4.47 se muestran las deformaciones registradas en el CFK a partir del centro de la probeta para el nivel de carga mencionado, además se muestra la línea de tendencia y su ecuación de

segundo orden obtenida por el método de mínimos cuadrados. Se puede observar la adecuación de ésta con los valores registrados por las galgas extensométricas.

Por último, en la tabla 4.2 se muestra un resumen de los resultados y los datos estadísticos obtenidos tras finalizar los ensayos de adherencia.

4.3 Ensayos de Caracterización a Tracción Directa de los CFRP

Los resultados de los ensayos de caracterización de los CFRPs de acuerdo a la norma ASTM D 3039 “Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites” [ASTM D 3039, 1989], se presentan a continuación redactando las observaciones generadas durante la campaña experimental. Toda la información generada de en los ensayos realizados se recoge en el Anejo C.

El mecanismo de rotura observado en los ensayos de caracterización se relaciona con el comportamiento de los tejidos de FRP mencionado en el capítulo 2, en donde las fibras van rompiendo gradualmente transfiriendo la carga a las fibras adyacentes, por este motivo no fue posible registrar las deformaciones mediante las galgas extensométricas hasta la rotura sino solamente en la primera etapa del ensayo, antes de que comenzara a



Figura 4.48. Ensayo de caracterización del sistema de refuerzo TFC: (Izq.) Inicio del ensayo; (Der) Rotura.

saltar la resina por la rotura de las fibras, lo que ocasionó el desprendimiento de las galgas extensométricas. En la figura 4.48 se muestran fotografías de uno de los ensayos en distintas fases; en la figura de la izquierda se muestra la probeta al inicio del ensayo, en donde se puede observar el estado de la superficie de la resina comparada con la fotografía derecha en la que se puede distinguir una fisuración en forma de mapa en toda la superficie de la probeta existiendo desprendimiento de la resina en algunas zonas e incluso de las galgas en fase de rotura.

De cualquier forma, los datos registrados mostraron un comportamiento elástico lineal del material, por lo que fue posible determinar el módulo de elasticidad y a partir de la carga máxima registrada por la célula de carga de la prensa, la tensión en rotura del TFC.

Cabe mencionar que la prensa utilizada en estos ensayos tiene instalado un LVDT en el actuador de carga que se podría haber utilizado para medir la deformación entre mordazas hasta rotura, sin embargo, no es recomendable la utilización de este sistema de medición para este tipo de ensayos, ya que existen varios dispositivos como las mordazas, los cuales sufren deformaciones parásitas que pueden alterar de manera significativa los valores reales de la deformación de la probeta.

En la figura 4.49 se muestra la gráfica Tensión-Deformación del ensayo TFC-3, en donde se puede observar el comportamiento elástico lineal del TFC.

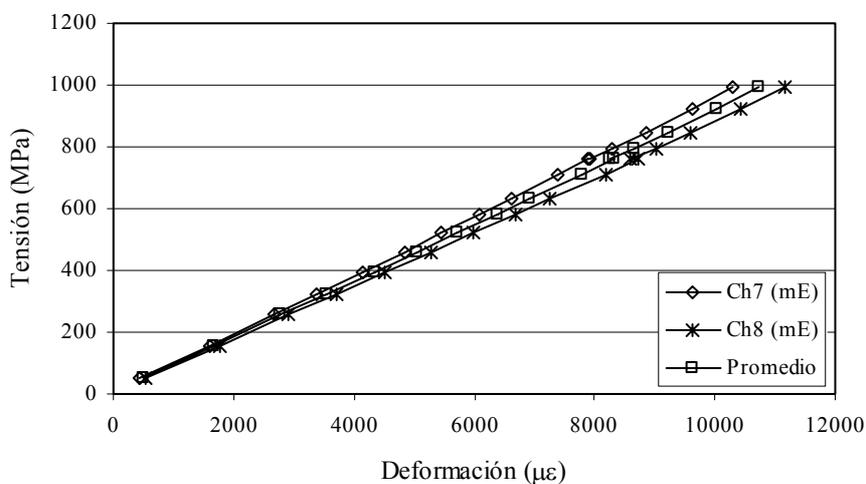


Figura 4.49. Gráfica Tensión-Deformación de la probeta TFC3.

En la tabla 4.3 se muestran los resultados y datos estadísticos referentes a los ensayos realizados con el sistema de refuerzo TFC.

Tabla 4.3. Resultados y datos estadísticos de los ensayos de caracterización del TFC.

Probeta	E¹ (MPa)	f_{yu} (MPa)	ε (%)
TFC-1	100,101	1,684	1.68
TFC-2	98,664	2,017	2.04
TFC-3	90,613	1,917	2.12
TFC-4	107,859	1,726	1.60
TFC-5	104,193	1,921	1.84
<i>Promedio</i>	<i>100,286</i>	<i>1,853</i>	<i>1.86</i>
<i>D. Estándar</i>	<i>6,497</i>	<i>142</i>	<i>0.22</i>
<i>Varianza</i>	<i>6%</i>	<i>8%</i>	<i>12%</i>

¹ Módulo de elasticidad calculado con la tangente de la curva Tensión-Deformación.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados experimentales de la caracterización del CFK, los cuáles fueron proporcionados por el Ing. José Sena Cruz [CRUZ, J. M. S. & BARROS, J. A. O., 2002], ya que como el CFK es un producto industrializado no tiene sentido el volver a ensayarlo.

Tabla 4.4. Resultados y datos estadísticos de los ensayos de caracterización del CFK [CRUZ, J. M. S. & BARROS, J. A. O., 2002].

Probeta	E¹ (MPa)	E² (MPa)	f_{yu} (MPa)	ε (%)
CFK-1	145,500	159,700	2789.4	1.73
CFK-2	174,600	155,800	2640.6	1.65
CFK-3	154,700	160,800	2788.4	1.71
<i>Promedio</i>	<i>158,300</i>	<i>158,800</i>	<i>2739.5</i>	<i>1.70</i>
<i>D. Estándar</i>	<i>14,900</i>	<i>2.6</i>	<i>85.6</i>	<i>0.04</i>
<i>Varianza</i>	<i>9.4%</i>	<i>1.7%</i>	<i>3.1%</i>	<i>2.5%</i>

¹ Módulo de elasticidad calculado de acuerdo con la norma ISO-527-5.

² Módulo de elasticidad calculado de acuerdo con el ACI.