

CAPITULO 7

CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES FUTURAS

En este capítulo se mencionan las conclusiones generadas de las investigaciones y trabajos experimentales basados en los objetivos iniciales. Primeramente se presentan conclusiones generales y enseguida se describen las conclusiones específicas separadas en cinco aspectos y, finalmente, se mencionan perspectivas futuras para próximos trabajos de investigación en este tema.

7.1 CONCLUSIONES GENERALES

En los ensayos en general, donde se reforzaron o repararon probetas de hormigón, se ha verificado que la principal limitación (criterio condicional) fue la baja resistencia superficial del hormigón, comparada con la alta resistencia a tracción de los materiales compuestos aramida y carbono. La capacidad de refuerzo puede ser incrementada anclando los extremos de las láminas, aunque este tipo de aplicación descarta el uso de láminas rígidas como las de aramida aquí utilizadas, debido a que, su rigidez no permite dobleces que permitan envolver, abrazar o seguir el contorno de la superficie de vigas de hormigón como pueden ser las vigas de sección transversal "I" o "T".

Las láminas rígidas tienen la ventaja de una aplicación más rápida pero limitada a superficies planas en comparación con las láminas de fibras de tejido, como las de tejido de fibras de Carbono. Es de fácil y rápida aplicación sobre la superficie de hormigón a reforzar.

7.2 CONCLUSIONES ESPECIFICAS

7.2.1 Referente a: La caracterización de materiales compuestos.

En la preparación de probetas de aramida y carbono para realizar los ensayos a tracción, con los que se determinó la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad, se requirió de una preparación diferente, ya que las láminas de fibras de Aramida ya vienen embebidas en la resina, habiendo sido previamente polimerizada la resina junto con las fibras de aramida, lo cual implica una manipulación sobre láminas rígidas. Las

láminas de fibra de carbono requirieron una manipulación cuidadosa del tejido bidireccional de las mechas de fibras de carbono, cortándolo a las medidas requeridas y tejiéndolo en sus contornos, y posteriormente embebiéndolo en la resina antes de polimerizar. La preparación del material compuesto requiere de una superficie sobre la cual se desprenda con facilidad la lámina una vez polimerizada, como pueden ser placas de metacrilato de 2mm de espesor. Respecto a la instrumentación de las probetas, las láminas de carbono requieren ser instrumentadas cuando la resina aún no ha polimerizado, de tal forma que la galga de deformación quede embebida en la resina. En términos generales, la preparación de probetas de fibras de Aramida requirió de menos pasos para su preparación e instrumentación que las probetas de fibras de carbono, ya que sólo fue necesario pulir la superficie de contacto para adherir la galga de deformación.

En los ensayos a tracción, en las láminas de fibras de aramida no se pudo determinar en forma precisa la resistencia máxima sobre las probetas, ya que se desarrolló una contracción sobre los extremos de la probeta de donde se sujetó por medio de mordazas. Instante antes de que la probeta fallara por tracción, rompiendo siempre en uno de sus extremos, ésta presentaba un salto en la resistencia a tracción, un instante antes de que la fibra fallara a causa del endurecimiento instantáneo, tal como muestra la gráfica 5.1, en la que se graficó la Carga vs. Microdeformaciones. A diferencia de las láminas de aramida, las láminas de carbono fallaron en general por el centro de la probeta sin presentar ningún salto en la resistencia a tracción.

Una de las limitaciones de la instrumentación de las probetas de fibra de carbono es que si las galgas de deformación están en contacto directo con las fibras de carbono, el circuito se cierra, impidiendo realizar la lectura de las microdeformaciones en el material compuesto. Debido a esto, es necesario que exista una capa de resina entre las fibras de carbono y la galga, y posteriormente otra capa de resina sobre la galga de deformación.

7.2.2 Referente a: La metodología en los ensayos.

En la preparación de la resina epóxica en la que se embebe el TFC, se debe evitar que en la dosificación de los componentes se tenga un error mayor al 5%, ya que esto puede significar que la resina no reaccione adecuadamente y se mantenga en un estado plástico o semi-endurecido. El remover una resina con defectos de

endurecimiento puede implicar la demolición parcial del hormigón de un elemento estructural. Para tener un mayor tiempo de trabajabilidad de la resina, será necesario refrigerar la resina y el endurecedor de la mezcla (*catalizador*).

El dimensionamiento de probetas de hormigón depende de varios aspectos dependientes de la técnica y el equipo disponibles como pueden ser:

Las características de la máquina de ensayo (prensa hidráulica): Dimensiones, capacidad de carga y el área disponible alrededor de la prensa para hacer las maniobras necesarias para instrumentar y ensayar la probeta de hormigón en estudio.

Por una parte el número de probetas obtenidas por cada amasada está en función de la capacidad de la planta de hormigonado. Se recomienda que todas las probetas de cada serie sean de hormigón de una misma amasada.

El hormigón de ambas campañas experimentales fue dosificado con el mismo diseño de mezcla. Aunque las probetas de hormigón de cada campaña fueron fabricadas con hormigón de diferente amasada, dicho hormigón no presentó diferencias en los materiales, ya que los áridos, cemento y aditivos fueron dosificados en las mismas proporciones bajo la especificación del diseño de mezcla.

Las dimensiones de las probetas estuvieron restringidas en la longitud entre apoyos para desprestigiar los efectos por flexión y poder considerar únicamente efectos por cortante, generando un plano de fisuración vertical en las probetas de las series monolítico sanas y reforzadas.

Una vez fabricadas las probetas se determinó que era necesario pulir la superficie de hormigón que hace contacto entre la probeta y el pistón, ya que es necesario asegurar la existencia de un perfecto contacto entre el pistón de carga y la superficie del hormigón, todo esto con la finalidad de impedir cualquier falso acoplamiento en la superficie de contacto y también, asegurar que se tiene una superficie horizontal de contacto.

Para llegar finalmente a la configuración final de la probeta se requirió hacer algunos preensayos hasta llegar a obtener la configuración de la probeta que desarrollara la fisuración requerida, teniendo que realizar entallas en las probetas.

7.2.3 Referente a: Las variables de respuesta obtenidas en ensayos a cortante.

Dependiendo de la dirección en la que se desarrollan las fisuras y desplazamientos en los preensayos, se deben medir las deformaciones y desplazamientos sobre la superficie del hormigón, y de esta forma definir los puntos más adecuados sobre la probeta o elemento estructural en los que se colocará la instrumentación, ya sea por medio de bandas extensométricas o transductores (LVDT).

Es importante aplicar una velocidad de desplazamiento del pistón igual o inferior a 0.002mm/segundo, con la finalidad de obtener una mejor respuesta tensión-deformación. El control de velocidad es sencillo si se trabaja con un sistema hidráulico controlado por ordenador. Aplicar una baja velocidad asegura que se está trabajando con un ensayo de tipo estático con el cual se obtiene una mejor respuesta por parte del elemento en estudio.

7.2.4 Referentes a: Los resultados experimentales.

Durante las etapas de la campaña experimental de los materiales compuestos de fibras de aramida y de tejidos de fibra de carbono (*TFC*) se observaron mucho más ventajas a favor de los laminados compuestos por dichos tejidos.

Los resultados experimentales de la caracterización a tracción de los laminados muestran que los laminados de tejidos tienen resultados más fiables frente a los obtenidos por los laminados de aramida, ya que estos laminados rompen inadecuadamente por uno de sus extremos y, además rompen presentando un incremento de carga instantáneo justo en el momento en que rompe el laminado, dando un valor máximo de carga no tan preciso.

En la sección 6.2.4 se comentó que el sistema de bandas rígidas de aramida tiene una capacidad de carga del doble de soporte con respecto a las bandas flexibles de carbono al comparar las tablas 6.11 y 6.12 con respecto a las tablas 6.3 y 6.4, pero dicha reflexión es real sólo si se trabaja con láminas de carbono con fibras unidireccionales, lo cual no es este el caso, ya que se trabaja con un tejido con fibras transversales. Al realizar el cálculo de la relación de fuerzas verticales que intervienen en los ensayos Mon-Rep y TRI-Unión de cada tipo de orientación de las láminas, se

pudo determinar que, en el caso de las láminas de carbono, las mechas de fibras orientadas transversalmente aportan un importante porcentaje de carga vertical, comentario que se realizó al final de la sección 6.2.4. El hecho de existir fibras de refuerzo en sentido transversal en el sistema Carbono (TFC) ayuda a que el comportamiento del ensayo sea dúctil, caso que no se presenta en los ensayos de Mon-Rep y TRI-Unión del sistema Aramida. Esta diferencia presenta una buena justificación para optar por la aplicación de láminas de tejido de carbono como refuerzo a cortante sobre la aplicación de láminas unidireccionales como las de aramida.

La aplicación de láminas de aramida tiene la desventaja de que la resina de adherencia al hormigón no es del propio material compuesto, sino una resina epóxica que no puede ser caracterizada junto con las láminas de aramida.

Las láminas de aramida presentan problemas de adherencia con la resina epóxica, ya que dichas láminas se desprendían parcialmente dejando la resina epóxica adherida al hormigón durante los ensayos, poniendo como ejemplo las figuras 38, 42, 52, 58 y 63 del anexo A.

Referente a la aplicación de laminados de tejidos de fibras, es importante tener presente que, en ningún caso se superó el 25% de la capacidad de carga del laminado.

7.2.5 Referente a: Las aplicaciones de los laminados de FRP

En trabajos donde hay que reforzar elementos estructurales de hormigón armado, la aplicación de laminados de TFC, presenta una mayor precisión en el cálculo del esfuerzo cortante, frente a los laminados de aramida, ya que, la resina epóxica de encolado para adherir los laminados de aramida sobre la superficie de hormigón, es distinta a la resina del compuesto de aramida. Al ser diferente la resina de encolado, la resistencia a las tensiones tangenciales y normales sobre la superficie del hormigón variará, y esto requeriría un estudio previo para cada tipo de resina de encolado utilizada en laminados de aramida. En la aplicación de los laminados, el TFC presenta las siguientes ventajas:

- Buena flexibilidad en la adaptación a la geometría de la superficie
- Facilidad de transporte y manipulación del tejido y componentes de la resina.
- Aplicación precisa sobre elementos estructurales, realizando cortes sobre el tejido, ya sea con tijeras o un cuchillo.
- Los laminados de TFC se pueden adherir envolviendo o rodeando el contorno de un elemento estructural.

De acuerdo a la tabla 6.17 se tiene que, el refuerzo a cortante con la orientación de las láminas de carbono en sentido vertical o cruzadas en X implica una pérdida de material del 42% de tejido y, con las láminas orientadas horizontalmente una pérdida del 17%. Estos resultados indican, que el mayor refuerzo a cortante se obtiene, orientando las fibras del tejido longitudinal del laminado, a 45° con respecto al plano de cortante.

En promedio, se obtuvo una carga máxima de 88.90 kN en la serie de ensayos TRI-Unión 45° carbono, de la cual las láminas tomaron una carga de 33.82 kN (ver tabla 6.15), requiriendo para esto 512 cm^2 (0.0512 m^2) de TFC. Esto representa una capacidad de carga vertical del laminado de 600 kN/m^2 . Este tipo de ensayo viene a ser semejante al efecto dovela con juntas secas (en ausencia de resina epóxica entre dovelas), el cual puede aplicarse análogamente, como refuerzo a cortante en la construcción de puentes de dovelas de luces medias, que presenten deficiencias en el preesfuerzo por causas ya sea por fluencia del hormigón o la pérdida de pretensado del acero, pero, para que la aplicación sea análoga a los ensayos TRI-Unión 45° , se tendría que prescindir de las llaves de cortante en las dovelas, tal como se muestra en la figura 7.1.

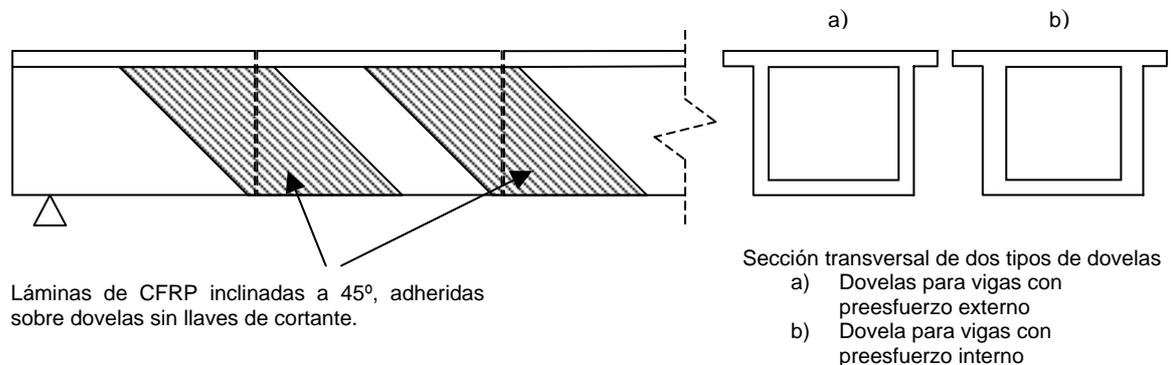
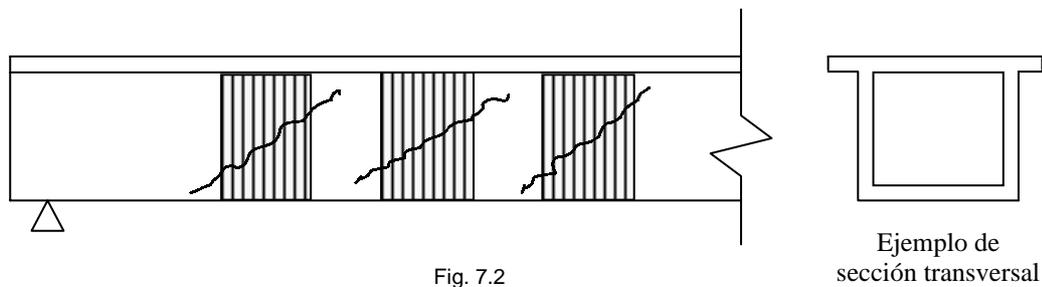


Fig. 7.1 Esquema que ejemplifica la aplicación de laminados como refuerzo a cortante en el extremo de un puente de dovelas, ya sea con preesfuerzo externo o interno.

La aplicación de refuerzo a cortante, mediante laminados de TFC en puentes de vigas monolíticas, sería distinta, ya que los planos de cortante no son verticales como en el caso de las dovelas, sino que aparecen de acuerdo a la inclinación de las fisuras por cortante, que se generan en promedio con una inclinación de 45° , más menos 20° aproximadamente, según la inclinación de los esfuerzos principales donde existe únicamente cortante, y dependiendo de la zona de la viga [González, Robles (1974); Murcia, Aguado, Marí (1993)].

De acuerdo al ángulo de inclinación de las fisuras por cortante, el refuerzo laminar se tiene que aplicar verticalmente, formando el eje principal del tejido del laminado (fibras longitudinales), un ángulo de 45° con respecto a las fisuras de cortante, tal como se muestra en la figura 7.2



Por otra parte el refuerzo exterior con laminados ayuda a evitar el empuje al vacío en las zonas donde el hormigón se encuentra traccionado en las aristas en vigas, que además de estar sometidas a flexión y cortante, presentan torsión.

En trabajos de reparación, la aplicación de laminados de TFC presenta mayores ventajas que los laminados de aramida. En la aplicación de TFC en la superficie de hormigón, se debe crear una superficie rugosa, para generara una superficie más cohesiva, de preferencia con diferencias superficiales no mayores a 3mm, la finalidad únicamente es hacer visible la superficie del árido que constituye el hormigón. Se requiere limpiar la superficie eliminando el polvo y grasa para permitir una buena adherencia de la resina epóxica. A pesar de que en los ensayos realizados en las series MonRep no se les efectuó ninguna reparación interna a las fisuras, ya que esto implicaba considerar una variable más en los ensayos, se recomienda que las grietas estén libres de polvo, para que la inyección ya sea de resina epóxica o lechada (mortero), selle eficientemente la fisura a lo largo de toda su longitud.

La aplicación de tejidos de TFC tanto como elementos de refuerzo o reparación sobre estructuras de hormigón armado, en zonas sujetas a esfuerzo cortante, debe tener una orientación preferentemente del eje principal del tejido a 45° con respecto a la dirección en que se generan las fisuras a cortante, ya que esta es la orientación más eficiente de refuerzo a cortante. Esta orientación es muy práctica en vigas, ya que las bandas de tejido son adheridas verticalmente formando un ángulo aproximado de 45° con respecto a las fisuras por cortante que se generan en la viga. Esta orientación impide que el tejido transversal este alineado con las fisuras de cortante, evitando el desprendimiento prematuro de éste sobre las fisuras, a causa del deslizamiento y la abertura de dichas fisuras tal como se describió en la figura 4.10.

7.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para futuras investigaciones queda el reto de incrementar la aportación de resistencia a tensiones de tracción en la reparación o refuerzo en vigas de hormigón mediante materiales compuestos. Para esto se da la pauta para desarrollar un método más adecuado para hacer efectivo el refuerzo con láminas de FRP, favoreciendo el modo de anclaje en los extremos de los laminados de refuerzo. En esas futuras investigaciones se sugiere limitarse a la aplicación de láminas de tejido de fibras de carbono. Uno de los principales objetivos es emprender ensayos, donde se puedan desarrollar tensiones sobre las láminas de refuerzo superiores al 25% de su capacidad a tracción, valor que no pudo ser superado en las campañas experimentales de este trabajo.

En cuanto al anclaje de las láminas de carbono, como refuerzo a cortante, debe estudiarse por una parte el anclaje de las láminas de carbono al hormigón sobre la zona de fisuras, y por otra parte se debe estudiar un tipo de anclaje en los extremos de las láminas adheridos sobre las vigas de hormigón, tal como se muestra en la figura 3.23, ya que cada tipo de anclaje requiere un estudio independiente para conocer su aportación como refuerzo a cortante.

La recomendación de tomar la debida atención en el estudio del tipo de anclaje de las láminas de refuerzo está motivada, entre otras cosas, para evitar un desprendimiento prematuro de las láminas de refuerzo durante los ensayos. La sugerencia de aplicar laminados de tejido de fibra de carbono está motivada por ser un material que presenta mayor manejabilidad para ser adherido a superficies de hormigón con aristas, a las que se puede rodear su contorno, ya sea como material de refuerzo o reparación.

Aplicar refuerzo a cortante exterior mediante materiales compuestos, es aun un campo poco explorado, ya que ofrece intuitivamente buenos resultados en cuanto a capacidad de carga en estructuras se refiere. El optar por abrir una línea de investigación en éste tema, implicará conocer la problemática actual tanto de diseño como mantenimiento de puentes de dovelas, ya sean colgantes, atirantados, o por voladizos sucesivos, tanto para reparación como para refuerzo.

Desplazándose a otros temas se tiene que el comportamiento estructural de elementos de hormigón, tanto reforzados, como reparados con materiales compuestos, estará siempre sometido a solicitaciones dinámicas por lo que es recomendable crear campañas experimentales destinadas a estudiar el comportamiento de los materiales de refuerzo bajo solicitaciones de servicio por medio de ensayos, en los que se reproduzcan las condiciones reales de trabajo mediante ensayos de fatiga. Efectuar estos ensayos, implica la disposición del equipo de prueba por largos periodos de tiempo, y la coordinación de tiempos con otras investigaciones que requieren el mismo equipo de ensayo.

En posteriores investigaciones será recomendable usar otras herramientas para el diseño de futuros prototipos de prueba, usando herramientas como los métodos numéricos, combinándolos con los estudios y ensayos en laboratorio. Mediante el uso de herramientas como la teoría de los elementos finitos se puede realizar simulaciones para conocer el comportamiento en cuanto a las deformaciones y esfuerzos en probetas cuando se cambia la geometría propuesta para acertar más efectivamente en las adecuaciones de futuros trabajos experimentales en laboratorio.