

# 8

## Estructuras pretensadas con tendones de material compuesto

Francesc Puigvert

**Resumen** Los tendones de acero de estructuras pretensadas están sometidos a efectos de corrosión. En infraestructuras críticas, tales como puentes, se está estudiando la posibilidad de sustituir los tendones de acero por barras de material compuesto debido a su alta resistencia a la corrosión, especialmente el *CFRP*. Uno de los retos asociados es el desarrollo de un anclaje adecuado para este tipo de material. Anclajes de sujeción mecánica y adhesiva han sido estudiados para esta finalidad. En este capítulo se analizan los parámetros y características más importantes de ambos anclajes a partir de la campaña experimental llevada a cabo en el grupo de investigación CER-LITEM BarcelonaTECH. Aunque las configuraciones de los anclajes estudiadas hasta el momento no permiten alcanzar la máxima resistencia de los tendones, el uso de tendones de material compuesto y sus anclajes puede ser una alternativa razonable en ambientes donde la protección a la corrosión puede llegar a ser muy costosa.

### 8.1. Introducción

Las estructuras de hormigón pretensadas presentan el inconveniente que la armadura activa, actualmente de acero, está sometida a efectos de corrosión que reduce la durabilidad de la estructura y sus prestaciones mecánicas. La corrosión que se produce en la armadura es un proceso electroquímico que puede presentar rotura frágil cuando se utilizan determinados aceros y procesos de fabricación. En este tipo de corrosión el proceso anódico se inicia por una picadura que se propaga hacia el interior del acero en forma de canales cilíndricos [3]. Debido al elevado grado de tensión de la barra, generalmente alrededor del 60 % de la tensión de rotura, se acaba produciendo una rotura frágil.

---

**Francesc Puigvert**

Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria  
Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, Colón 11, TR45, Terrassa, 08222 Barcelona, España  
*e-mail*: francesc.puigvert@upc.edu

DOI: [10.3926/oms.206](https://doi.org/10.3926/oms.206) • Omnia Publisher, 2014

En las últimas décadas investigadores de todo el mundo han realizado estudios para la incorporación de materiales compuestos *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* como armadura activa en estructuras de hormigón pretensado. Las ventajas que ofrecen son su alta resistencia, ligereza y alta resistencia a la corrosión. No obstante, debido al alto coste de la producción de los materiales compuestos con respecto a los materiales convencionales, la utilización de estos materiales se destina a aplicaciones donde las características son únicas para materiales compuestos. Una de las principales ventajas de los materiales *FRP* es la capacidad de configurar el refuerzo adecuado con el objetivo de desarrollar una capacidad resistente específica y cumplir con los objetivos de diseño. Los tendones de *FRP* destinados al pretensado pueden ser tendones individuales o agrupados en cordones. La textura de la superficie de los tendones también puede variar. A diferencia del refuerzo de acero convencional, no hay formas estándar. La configuración de la superficie, la orientación de la fibra, la constitución del material y las proporciones del producto final pueden ser definidas para cada aplicación. De la misma manera, no hay una estandarización del método de fabricación para una aplicación específica. Así, los materiales compuestos requieren un esfuerzo de ingeniería para su correcta utilización.

Los tendones *FRP* son fabricados -normalmente- de tres fibras básicas. Estas fibras son la aramida, el vidrio y el carbono. La selección de la fibra se basa principalmente en la consideración del coste, la resistencia, la rigidez y la estabilidad a largo plazo. Dentro de este grupo de fibras, hay un amplio abanico de posibilidades con la finalidad de obtener el rendimiento y las características necesarias [1]. La matriz del material compuesto suele ser un polímero termoestable, de entre los cuales destacan la matriz de poliéster, vinil éster, epoxi, fenólica y poliuretano. La formulación y las propiedades fisicoquímicas de las resinas son prácticamente ilimitadas. Además, los materiales compuestos son heterogéneos y anisotrópicos. Las características finales del material compuesto *FRP* dependen de las propiedades de la fibra y la matriz, así como del proceso de fabricación. Mientras que los tendones de fibras de vidrio y aramida muestran resistencias a la tracción parecidas a la de los tendones de acero, los tendones de fibra de carbono tienen un 20-25% más de resistencia a la tracción que los tendones de acero. No obstante, la resistencia a corte de los tendones de material compuesto es de gran preocupación para las aplicaciones de pretensado donde el esfuerzo cortante es elevado en la zona de los anclajes. Los tendones *FRP* presentan una respuesta elástica lineal hasta rotura. Los módulos elásticos de los tendones *GFRP (Glass-FRP)* y *AFRP (Aramid-FRP)* son del orden de 25-30% de la de los tendones de acero, mientras que los tendones *CFRP* tienen módulos de elasticidad del 75 al 85% de los del acero. Según la norma ACI [1], el material de fibra de carbono puede desarrollar las mismas propiedades mecánicas que el acero utilizado en las armaduras activas.

Las investigaciones realizadas hasta el momento indican que el hormigón pretensado con *CFRP* es una opción duradera en el diseño de estructuras para su uso en ambientes corrosivos [7]. Además, por condiciones de durabilidad, fatiga y fluencia, los tendones muestran un mejor comportamiento. Por tanto, por criterios de durabilidad, los nuevos materiales de fibra de carbono resisten mejor las condiciones fisicoquímicas adversas. No obstante, aunque los materiales tienen excelentes propiedades para su uso en estructuras pretensadas, aun es necesaria la investigación en esta área. Una de las principales cuestiones es su anclaje. Debido a la gran anisotropía del material *FRP*, las fuerzas perpendiculares producidas por el

anclaje podrían dañar el material compuesto a nivel transversal [16]. Es por esta razón que los sistemas convencionales de anclaje para tendones de acero no pueden ser utilizados con materiales compuestos debido a sus propiedades transversales.

Este capítulo describe en primer lugar el estado de la técnica de los sistemas de anclajes para tendones de material compuesto y las investigaciones realizadas al respecto. También se incluye las formulaciones analíticas desarrolladas por diferentes investigadores con la finalidad de conocer el estado tensional de los anclajes. En segundo lugar se presentan los resultados más destacados obtenidos en el laboratorio CER-LITEM BarcelonaTECH. Este apartado finaliza con la discusión de los resultados obtenidos y las conclusiones generales. Finalmente se presentaran las líneas de investigación futuras que serán desarrolladas a corto o medio plazo. En este capítulo no se contempla el comportamiento de los anclajes a largo plazo. Tampoco se considera el análisis de los anclajes mediante el método de elementos finitos *FEM*, ya que estos aspectos forman parte de las líneas futuras de investigación que ya están en desarrollo.

## 8.2. Estado de la técnica

La técnica del pretensado es un método que permite incrementar la capacidad portante de una estructura de hormigón teniendo en cuenta la debilidad de este material frente a esfuerzos de tracción. Se basa en la introducción de esfuerzos que producen tensiones de signo contrario a las producidas por las acciones aplicadas, con la finalidad de mejorar su resistencia o comportamiento. La técnica del pretensado fue patentada Eugène Freyssinet en 1920. El pretensado ha evolucionado mucho y actualmente se utilizan dos técnicas generales; hormigón pretensado con armaduras pretesadas o postesadas.

El sistema con armaduras pretesadas consiste en el tesado del tendón previamente a la fabricación de la estructura de hormigón. Es un método utilizado principalmente en elementos prefabricados. Esto permite una alta producción en serie. A continuación se detallan las etapas del proceso del pretensado (véase Figura 8.1).

- Etapa 1. La armadura es tesada y fijada a dos anclajes fijos por sus extremos. Estos anclajes solo son utilizados durante el proceso de fabricación.
- Etapa 2. Se coloca el molde que dará forma a la estructura de hormigón. Se coloca la armadura pasiva requerida. Seguidamente se vierte, se compacta y se cura el hormigón.
- Etapa 3. Cuando el hormigón ha alcanzado una cierta resistencia, se transfiere la fuerza de la armadura de los anclajes a la estructura de hormigón en forma de compresión por medio de la fricción.
- Etapa 4. Se cortan los extremos de los tendones y la pieza es almacenada hasta el momento de su transporte a obra y montaje.

El sistema con armaduras postesadas consiste en el tesado de la estructura de hormigón cuando esta ya ha sido fabricada. Es un método utilizado mayormente en piezas hormigonadas *in situ*. A continuación se detallan las etapas del proceso de postensado (véase Figura 8.2).

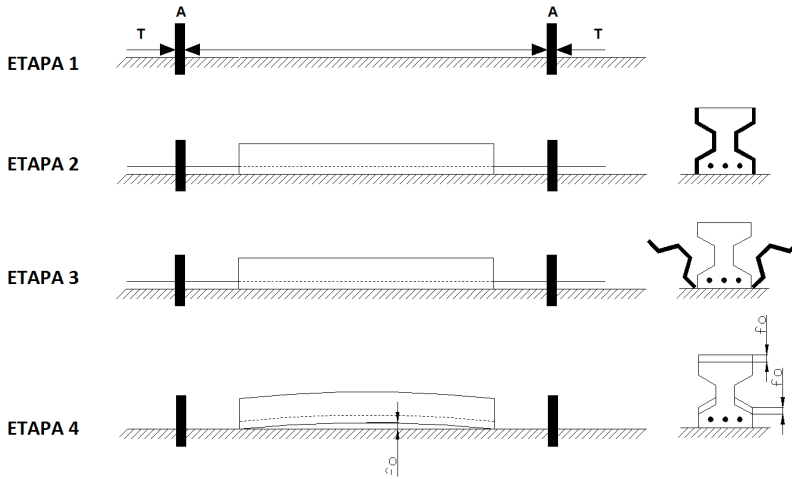


Figura 8.1: Representación del proceso de pretensado.

- Etapa 1. Se prepara el molde que dará forma a la estructura de hormigón. Se coloca la armadura pasiva requerida.
- Etapa 2. Se colocan las vainas que alojaron los tendones. A diferencia de los tendones pretesados, las vainas pueden adoptar formas curvilíneas.
- Etapa 3. Se procede al llenado del molde. Cuando el hormigón ha alcanzado una cierta resistencia, se introducen los tendones en las vainas y se abre el molde.
- Etapa 4. Se procede al postesado de los tendones. Generalmente se fija un extremo del tendón mediante un anclaje mecánico. Posteriormente se realiza el tesado del tendón desde el otro extremo y se fija cuando este ha alcanzado la carga de tracción deseada.

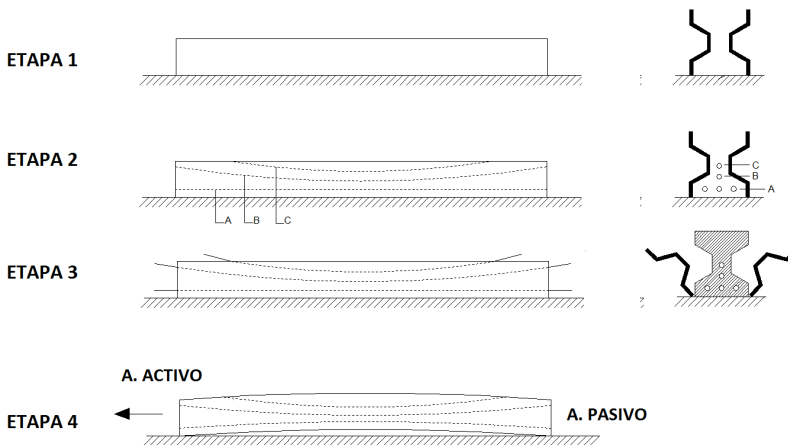


Figura 8.2: Representación del proceso de postesado.

Ya sea en la primera etapa del proceso de pretensado o en la última etapa del proceso de postensado, los tendones deben ser tesados mediante anclajes. Aunque los materiales compuestos tienen excelentes propiedades para este tipo de estructuras, aun es necesaria la investigación en esta área. Una de las principales cuestiones es su anclaje. Debido a la gran anisotropía del material *FRP*, las fuerzas perpendiculares producidas por los actuales sistemas de anclaje podrían dañar el material compuesto a nivel transversal [16]. Es por esta razón que los sistemas convencionales de anclaje para tendones de acero no pueden ser utilizados directamente con materiales compuestos.

Los investigadores Rostàys y Budelman [4] determinaron que para el buen funcionamiento del anclaje, el conjunto debe tener un factor de eficiencia de 0,95. Es decir, el conjunto debe desarrollar una fuerza de tracción de más del 95% de la resistencia a tracción del tendón *FRP*. Mientras que el requisito anterior asegura que el anclaje no resta capacidad resistente al tendón, también es importante verificar que el anclaje permite la deformación adecuada del tendón al aplicar la fuerza de tesado.

Los fabricantes de tendones *FRP* han desarrollado nuevos sistemas de anclajes permitiendo que los materiales compuestos puedan ser tesados hasta el 90% de su resistencia máxima a tracción antes de producirse del colapso en la zona del anclaje. En general, el anclaje es de acero, pero también pueden ser realizados de material compuesto con la finalidad de evitar problemas de durabilidad. Los anclajes para tendones *FRP* se pueden clasificar en dos categorías (véase Figura 8.3); anclajes de sujeción mecánica y anclajes de sujeción adhesiva. El primer sistema fija el tendón ejerciendo presión radial mediante cuñas, mientras que el segundo sistema fija el tendón a través de una unión adhesiva.

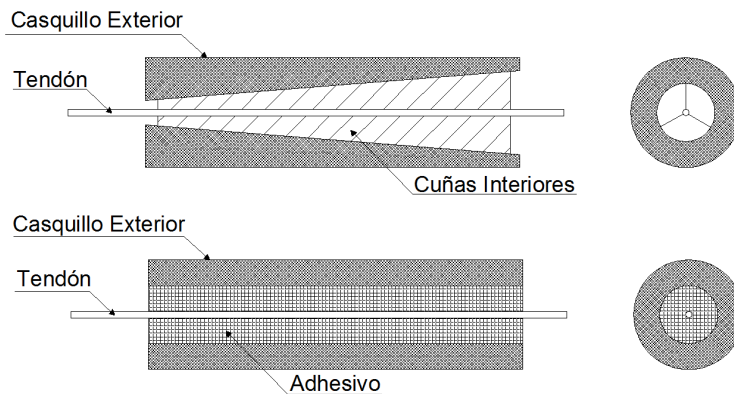


Figura 8.3: Esquema general de un anclaje de sujeción mecánica (arriba) y adhesiva (abajo).

### 8.2.1. Anclaje de sujeción mecánica

Los anclajes para tendones *FRP* de sujeción mecánica son muy parecidos a los sistemas convencionales para tendones de acero. No obstante, una serie de modificaciones deben ser realizadas para ser compatibles con el material compuesto. Los sistemas de anclaje convencional disponen de unos relieves endurecidos que se clavan al tendón para aumentar la

transferencia de carga. En sistemas con materiales compuestos, estos relieves deben ser eliminados ya que podrían dañar localmente el tendón. Principalmente, la diferencia entre los anclajes convencionales y los anclajes para tendones *FRP* radica en la interfase entre ambos. No obstante, varios investigadores han demostrado que los materiales *FRP* siguen trabajando a pesar de sufrir daños locales. A continuación se describen los dos sistemas más utilizados:

- **Anclaje abrazador.** Este sistema consta de dos placas de acero que intercalan el material compuesto. Las placas de acero son fijadas mediante pernos. La fuerza se transmite mediante un mecanismo de corte-fricción. Con este sistema se pueden pretesar tendones de sección circular o rectangular.
- **Anclaje con cuñas interiores.** En general son los anclajes más utilizados hasta el momento debido a su compacidad, facilidad de montaje, reutilización y fiabilidad. Además, el sistema de cuñas es ampliamente utilizado en tendones de acero. Los anclajes son modificados para su uso con materiales compuestos aumentando su longitud de contacto y eliminando los dientes endurecidos de las cuñas interiores. El mecanismo de sujeción se basa en la fricción generada entre las cuñas interiores y el tendón *FRP* durante el proceso de tesado (véase Figura 8.3 superior).

Los investigadores Nanni *et al.* [8] estudiaron el comportamiento del anclaje de sujeción mecánica con cuñas para tendones circulares y laminados de material compuesto. También analizaron el comportamiento del anclaje en función del material de las cuñas. Los investigadores realizaron ensayos experimentales cuasi-estáticos con diferentes configuraciones de anclaje con barras y laminados *FRP*. Los anclajes con cuñas interiores de poliamida PA6 mostraron fallos prematuros debidos a la plastificación de las cuñas interiores. No obstante, los anclajes con cuñas interiores de acero llegaron a superar el 95 % de la resistencia última a tracción del material *FRP*. Aunque no hubo pérdida de eficiencia, las cuñas interiores de acero provocaron daños locales a la fibra a bajos valores de carga. Cuando se utilizó un material de interfase entre el material compuesto y la cuña, el daño local se produjo en dicho material.

Es importante destacar que el sistema de transferencia de esfuerzos en la mayoría de los casos se realiza por fricción. Como mencionan Nanni *et al.* [8], se producen fuerzas transversales que actúan sobre el tendón que pueden llegar a colapsar la matriz del material compuesto. La determinación de esta componente es esencial para poder dimensionar un anclaje de sujeción mecánica con cuñas que permita desarrollar la totalidad de la fuerza a tracción del tendón. Los investigadores Taha *et al.* [16] determinaron en su estudio las fuerzas que interactúan entre las diferentes partes que componen el anclaje de sujeción mecánica con cuñas (véase Figura 8.4).

La fuerza de tracción del tendón debe ser igual a la fricción que actúa sobre el mismo. Por tanto:

$$P = F_{TW} \quad (8.1)$$

donde  $P$  es la fuerza de tesado y  $F_{TW}$  es la fuerza de fricción que actúa sobre el tendón. Por otra parte, la fuerza de fricción viene determinada por la componente normal entre el tendón y la cuña,  $R_{TW}$ :

$$F_{TW} = \mu_{TW} R_{TW} \quad (8.2)$$

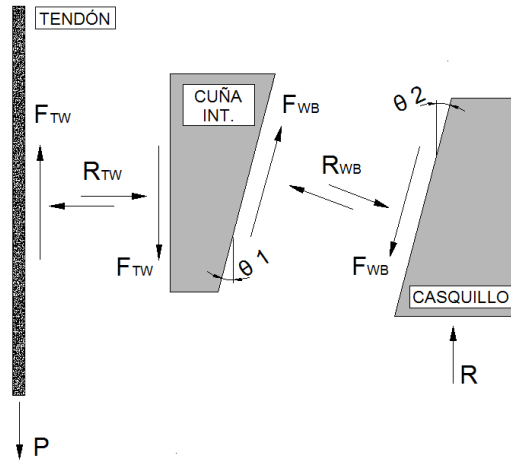


Figura 8.4: Modelo estático para anclajes de sujeción mecánica con cuñas interiores.

donde  $\mu_{TW}$  es el coeficiente de fricción estático entre el material compuesto y la cuña interior. De la misma manera sucede en el contacto entre la cuña interior y el casquillo exterior. Donde  $F_{WB}$  es la fuerza de fricción que actúa entre los dos cuerpos,

$$F_{WB} = \mu_{WB} R_{WB} \quad (8.3)$$

siendo  $R_{WB}$  la componente normal que genera la fuerza de fricción y  $\mu_{WB}$  el coeficiente de fricción estático entre la cuña interior y el casquillo exterior. Por otra parte, analizando las fuerzas longitudinales del anclaje de la cuña interior, se obtiene la siguiente expresión:

$$F_{TW} = F_{WB} \cos \theta_2 + R_{WB} \sin \theta_2 \quad (8.4)$$

De la misma manera, se puede analizar las fuerzas longitudinales del anclaje del casquillo exterior obteniendo la expresión:

$$R = F_{WB} \cos \theta_2 + R_{WB} \sin \theta_2 \quad (8.5)$$

Considerando una distribución lineal de la tensión radial que ejerce la cuña interior sobre el tendón  $FRP$ , siendo igual a cero en el extremo final del anclaje hasta un valor máximo en el inicio del mismo, la máxima tensión  $\sigma_{TW}$  se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{TW} = 2 \frac{R_{TW}}{2\pi r_T L_W} = \frac{R_{TW}}{2\pi r_T L_W} \quad (8.6)$$

donde  $r_T$  es el radio del tendón de material  $FRP$  y  $L_W$  es la longitud de la cuña interior. Por tanto, la matriz del material compuesto debe ser capaz de resistir la tensión máxima mostrada en la ecuación 8.6.

Los trabajos de los investigadores Schmidt *et al.* [12, 13] recogen las últimas novedades referentes a los anclajes de sujeción mecánica para tendones  $FRP$ . Los investigadores han estudiado diferentes configuraciones aunque los componentes involucrados siguen siendo los

mismos; anclaje, material de interfase y tendón. Por otra parte, también evaluaron el comportamiento de los anclajes mediante el método de los elementos finitos llegando a conseguir una predicción de carga y desplazamiento bien ajustada con los resultados experimentales que disponían. Su estudio concluye en que los actuales sistemas de anclaje de sujeción mecánica para tendones *FRP* no permiten desarrollar la máxima capacidad a tracción de dichos tendones, causando fallos prematuros.

### 8.2.2. Anclaje de sujeción adhesiva

El anclaje de sujeción adhesiva está formado por un casquillo exterior en el cual se inserta un tendón de *FRP*. Entre ambos materiales se distribuye un agente adhesivo que debe garantizar la perfecta unión. A diferencia de los anclajes de sujeción mecánica, los anclajes de sujeción adhesiva deben ser confeccionados previamente al proceso de tesado. Esto permite la posibilidad de elaborar los anclajes en un ambiente controlado de laboratorio con la capacidad de adquirir una alta calidad en la ejecución, así como una producción industrializada. Los dos modelos de falla más habituales en este tipo de anclaje son la rotura de la unión adhesiva y la excesiva deformación por fluencia del adhesivo. A continuación se muestran las configuraciones más utilizadas.

- **Anclaje circular con adhesivo.** Está formado por un casquillo de acero, el cual dispone de un cilindrado interior, el tendón de material compuesto y el agente adhesivo entre ambos. El mecanismo de transferencia de carga depende completamente de la adherencia entre el adhesivo y el sustrato. La sección del material compuesto para este tipo de anclaje puede ser circular o rectangular. El tendón con sección rectangular ofrece la ventaja que para la misma área resistente, la superficie de contacto con el adhesivo es mayor (véase Figura 8.3 inferior).
- **Anclaje cónico con adhesivo.** La única diferencia de este sistema con respecto al anterior radica en la forma del cilindrado interior del casquillo de acero. En este caso, la forma interior del casquillo de acero es cónica. El mecanismo de transferencia de carga es función de la unión adhesiva y el esfuerzo normal producido por la variación de espesor del perfil exterior.
- **Anclaje cónico con adhesivo de rigidez variable.** Un modelo alternativo al sistema anterior es la realización de un anclaje con diferentes adhesivos con el objetivo de obtener rigidez variable a lo largo de la longitud de adhesión. Las tensiones tangenciales en ciertos puntos de la longitud de adhesión pueden ser reducidas mediante esta técnica. La distribución de tensiones puede ser optimizada mediante el uso de diferentes adhesivos con diferentes módulos de elasticidad. No obstante, el proceso de construcción de un anclaje con diferentes adhesivos es de gran dificultad y, en la práctica, no es utilizado.

De la misma manera que los anclajes de sujeción mecánica, los investigadores Nanni *et al.* [8] estudiaron el comportamiento de los anclajes circulares con adhesivo. Los investigadores utilizaron diferentes tendones de material compuesto y adhesivos en su trabajo. Todos los anclajes fueron tesados hasta que se produjo la rotura en la interfase entre el tendón y el agente adhesivo cuando la barra no había alcanzado la totalidad de su resistencia a tracción.



Pincheira y Woyak [9] determinaron en su trabajo que la longitud de adhesión óptima es 50 veces el diámetro del tendón *FRP*. Con esta medida, la rotura del conjunto se debería producir por agotamiento de la resistencia última del tendón *FRP* a tracción.

Normalmente, el adhesivo utilizado suele ser resina epoxi en base poliuretano o metacrilato, ya que la resistencia a corte es más elevada. No obstante, estos polímeros suelen mostrar una pérdida de resistencia a altas temperaturas. Además, pueden tener problemas de excesiva fluencia y degradación en ambientes muy húmedos. Este hecho ha motivado a diferentes investigadores que han estudiado el uso de morteros como material adhesivo. Zhang y Benmokrane [19] estudiaron la utilización de mortero como elemento adhesivo en anclajes con un solo tendón y para anclajes con varios tendones. Los investigadores determinaron que hay un efecto de interacción cuando se usa más de un tendón debido al mecanismo de transferencia de carga entre el mortero y los tendones, mostrando un incremento en la rigidez del sistema. Los resultados obtenidos mostraron que se necesitó el doble de longitud de adhesión cuando se insertó más de un tendón en el mismo anclaje para alcanzar la misma fuerza de tesado hasta la rotura que un anclaje con un solo tendón. Por tanto, el uso de más de un tendón en el mismo anclaje no optimizó el conjunto.

Muchos de los investigadores que han realizado ensayos experimentales con anclajes de sujeción adhesiva han observado dos tipos de rotura diferentes. En el primer caso, la barra *FRP* llega a su límite de resistencia a tracción y se produce la rotura de la barra. Este tipo de rotura sería el ideal ya que se llega a agotar toda la capacidad del material compuesto y el anclaje no resta capacidad al conjunto. El segundo tipo de rotura -el más observado- es la rotura *pull-out*. Se produce el deslizamiento del material compuesto respecto al adhesivo debido al fallo de la superficie de adhesión. Cuando el tendón es traccionado, la superficie de unión está principalmente solicitada a esfuerzo cortante, ya que el anclaje es totalmente simétrico. Por tanto, los investigadores han centrado el interés en el análisis de la distribución de tensión tangencial en dicha unión adhesiva.

El análisis simple elástico lineal considera que el adhesivo solo se deforma por esfuerzo tangencial y que los sustratos son totalmente rígidos. La tensión tangencial en el adhesivo se considera constante a lo largo de la unión adhesiva. Este valor de tensión tangencial puede ser interpretado como la tensión tangencial media en la longitud de adhesión. Aunque este análisis no es muy realista, aun es mencionado por las normas ASTM e ISO.

Por otra parte, el investigador Olaf Volkersen [18] introdujo el concepto de diferencia tangencial. Todos los trabajos posteriores parten de su análisis. En su trabajo se considera un cuerpo simétrico donde solo actúan acciones longitudinales. El análisis de Volkersen consideró que el adhesivo se deforma por tensión tangencial pero que los elementos exteriores pueden ser deformados por tensión normal y tangencial ya que son considerados elásticos y no rígidos. La tensión tangencial es máxima en los extremos de la unión y es mínima en el centro. Este análisis no contempla el efecto por una flexión causada por una carga excéntrica. La solución de Volkersen es más representativa para uniones simétricas.

Posteriormente, los investigadores Goland y Reissner [6] fueron los primeros en contemplar en su análisis el momento flector y las fuerzas transversales introducidas por cargas excéntricas en uniones simples no simétricas. Más recientemente, Tsai, Oplinger, Morton (TOM) [17] consideraron la deformación tangencial en los elementos adheridos y la variación

de ésta linealmente a lo largo del espesor. Los investigadores mostraron que la formulación analítica desarrollada se ajusta mejor que las teorías clásicas cuando se utilizan materiales compuestos como elementos adheridos

Los trabajos anteriores consideran un comportamiento elástico por parte de los materiales que forman la unión. Esta hipótesis es correcta para adhesivos frágiles que tienen muy poca deformación plástica. Para adhesivos con grandes deformaciones plásticas antes de alcanzar su resistencia última, la plasticidad del adhesivo debe ser incluida para simular correctamente las distribuciones de tensión y deformación. Uno de los trabajos más importantes teniendo en cuenta la plasticidad del adhesivo fue presentado por Hart-Smith [14], donde desarrolló el análisis de Volkersen para uniones dobles y el trabajo de Goland-Reissner para uniones simples. El modelo de Hart-Smith representa la plasticidad del adhesivo utilizando un modelo de tensiones tangenciales elástico-plástico. Si se considera la plasticidad en el adhesivo, la predicción de la carga última es superior en comparación con un análisis elástico. La máxima resistencia de una unión adhesiva es calculada mediante la máxima deformación tangencial como criterio de falla.

Por otra parte, las formulaciones presentadas anteriormente están referidas a uniones adheridas de geometría plana siendo necesario generalizar las expresiones para geometrías de sección circular. Para ello el grupo de investigación CER-LITEM BarcelonaTECH desarrolló la formulación analítica de TOM para poder ser utilizada en uniones adhesivas circulares [10]. Se introdujo una tercera ecuación de equilibrio que considera el carácter circular de los anclajes. A continuación se presenta la formulación analítica desarrollada que permite conocer la distribución de tensión tangencial en la unión adherida de geometría circular. Siguiendo la nomenclatura de la Figura 8.5, la distribución de tensión tangencial en la unión adherida  $\tau_i$  se puede determinar mediante la expresión 8.7:

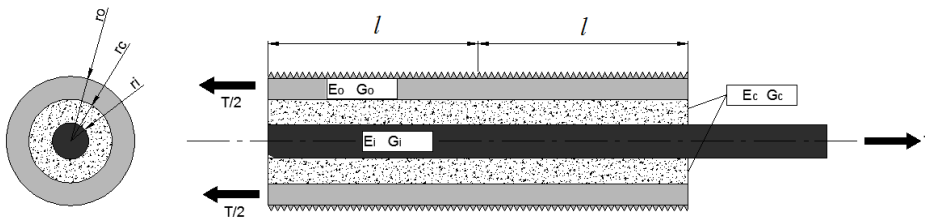


Figura 8.5: Geometría del anclaje circular.

$$\tau_i = A \sinh(\beta x) + B \cosh(\beta x) \tag{8.7}$$

siendo:

$$\beta^2 = \frac{\frac{G_c r_i}{(r_c - r_i)} \left( \frac{2}{E_i r_i^2} + \frac{2}{E_o (r_o^2 - r_c^2)} \right)}{1 + \frac{G_c}{(r_c - r_i)} \left[ \frac{5r_i}{12G_i} + \frac{1}{(r_o^2 - r_c^2)} \left( \frac{r_i (r_o - r_c) (r_o^2 - r_c^2)}{2G_o r_o} - \frac{r_i (r_o^4 - r_c^4)}{4G_o r_o (r_o - r_c)} \right) \right]} \tag{8.8}$$

donde los coeficientes A y B para una solución de tipo pull-pull son:

$$A = \frac{\beta l \tau_{mi}}{\cosh(\beta l)} \left( \frac{1 - \frac{E_i r_i^2}{E_o (r_o^2 - r_c^2)}}{1 + \frac{E_i r_i^2}{E_o (r_o^2 - r_c^2)}} \right) \quad (8.9)$$

y

$$B = \frac{\beta l \tau_{mi}}{\sinh(\beta l)} \quad (8.10)$$

y la tensión tangencial media en la unión adhesiva  $\tau_{mi}$  se define en como:

$$\tau_{mi} = \frac{T}{4\pi r_i l} \quad (8.11)$$

Finalmente, se define un criterio de fallo para este tipo de unión basado en tensiones máximas, esto es:

$$\tau_{max} = A \sinh(\beta l) + B \cosh(\beta l) < \tau_{adm} \quad (8.12)$$

donde la tensión tangencial admisible de la unión adherida  $\tau_{max}$  depende de los materiales adheridos, el tipo de adhesivo utilizado, el acabado superficial y la rugosidad de la unión adhesiva.

### 8.3. Estudio de anclajes para tendones de material compuesto

En el grupo CER-LITEM BarcelonaTECH se han investigado los anclajes de sujeción mecánica y los anclajes de sujeción adhesiva para tendones *CFRP*. La investigación se centró en el estudio experimental de los anclajes mediante ensayos cuasi-estáticos. En la Tabla 8.1 se muestran las propiedades mecánicas del tipo de tendón usado en todos los casos. El contenido de fibra y resina es del 65% y 35% en volumen, respectivamente. Los tendones fueron suministrados con una cierta rugosidad superficial con el objetivo de optimizar la adhesión en el caso de ser fijados con adhesivo.

Módulo elástico longitudinal (GPa)	Módulo elástico transversal (MPa)	Coefficiente de Poisson	Resistencia última a tracción (MPa)	Fuerza última a tracción <sup>†</sup> (kN)
$E_x = 141$	$G_{yz} = 1190$	$\nu_{yx} = \nu_{zx} = 0,007$	2500	125
$E_y = 3,3$	$G_{zx} = 1930$	$\nu_{xy} = \nu_{xz} = 0,288$		
$E_z = 3,3$	$G_{xy} = 1930$	$\nu_{zy} = \nu_{yz} = 0,374$		

<sup>†</sup> Tendón  $\varnothing = 8$  mm

**Tabla 8.1:** Propiedades mecánicas del material compuesto *CFRP*.

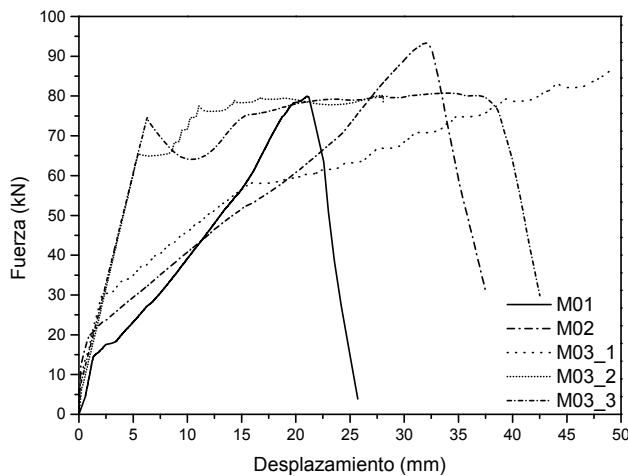
#### 8.3.1. Anclajes de sujeción mecánica

Se estudiaron diferentes configuraciones de anclajes de sujeción mecánica siguiendo los sistemas de anclajes que otros investigadores han utilizado [5, 8, 11]. Se fabricaron dos an-

clajes de sujeción mecánica con cuñas interiores para tendones *CFRP*. La rugosidad característica de los anclajes para tendones de acero fue eliminada para no dañar la matriz del material compuesto y homogeneizar la distribución de tensión que se ejerce sobre el tendón. Las probetas constaban de dos anclajes y un tendón de *CFRP* de 700 mm de longitud y 8 mm de diámetro. Los anclajes fueron fabricados con una longitud de 13 cm y las cuñas interiores disponían de una conicidad de  $2^\circ$ . Los ensayos se realizaron con el objetivo de determinar la carga última de las probetas al aplicar una fuerza de tesado. También se estudió el tipo de fallo producido.

Se ensayaron tres configuraciones distintas con el anclaje de sujeción mecánica. La primera de ellas corresponde al sistema más básico formado por el anclaje y el tendón *CFRP*, llamada M01. La configuración M02 incorpora un material de interfase entre las cuñas interiores y la barra *CFRP*. El hecho de incorporar un material de interfase responde a la necesidad de suavizar y homogeneizar las tensiones que ejercen las cuñas sobre el tendón [11]. El material utilizado en la interfase fue un perfil tubular de cobre con un espesor de 0,3 mm. La configuración M03 está formada por los mismos elementos pero con un espesor del material en la interfase de 1 mm.

La Figura 8.6 muestra las curvas de fuerza-desplazamientos obtenidas durante el proceso de tesado de los anclajes de sujeción mecánica. Es importante destacar que los valores de desplazamiento registrados corresponden al desplazamiento del equipo electromecánico. Esto incluye la deformación y desplazamientos relativos de los elementos auxiliares que formaron parte de los ensayos experimentales.

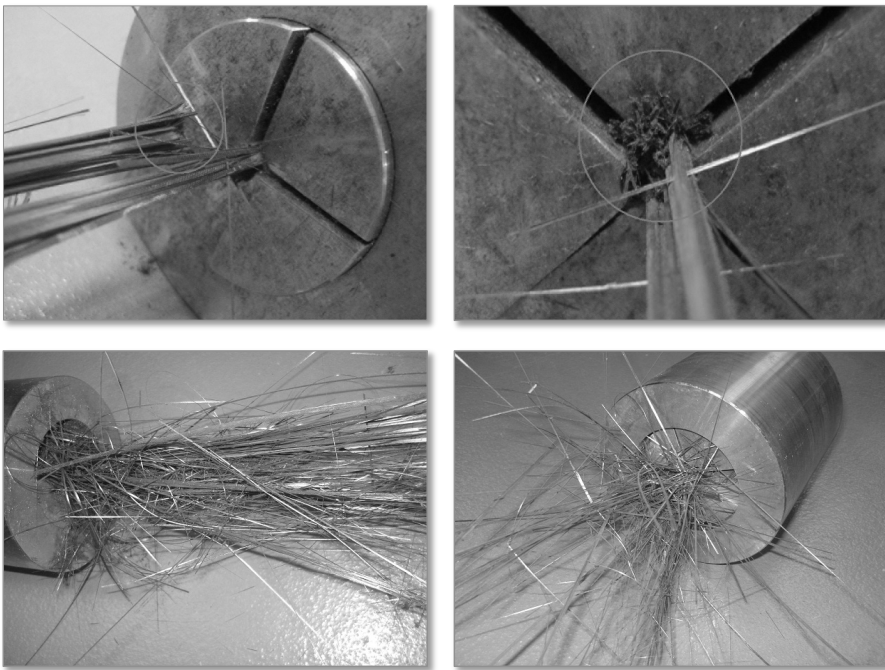


**Figura 8.6:** Diagrama fuerza-desplazamiento de los ensayos experimentales con anclaje de sujeción mecánica.

Desde un punto de vista cualitativo cabe destacar que, durante el proceso de tesado, las cuñas interiores dañaron localmente el tendón en valores de carga inferiores a los valores de rotura. A pesar de ello, los tendones siguieron trabajando sin pérdida de eficiencia. Por otra parte, la fijación del anclaje con el tendón se realiza durante el proceso de carga. La dificultad del proceso radica en garantizar el mismo desplazamiento para cada una de las cuñas

interiores. Un desplazamiento desequilibrado de las cuñas provoca que la presión radial, que debería ejercerse con la misma intensidad por todas las cuñas interiores, se ejerza solo por algunas de ellas. Esto provoca mayores concentradores de tensiones en el inicio del anclaje y, por lo tanto, el fallo del tendón a una carga inferior a la deseada. Una muestra de este efecto puede verse en la Figura 8.7 superior, donde el desplazamiento de las cuñas no es uniforme.

Como se muestra en la Figura 8.6, la configuración M01 alcanzó una carga máxima inferior a los demás sistemas. Mediante la utilización del sistema básico de anclaje y tendón, la carga máxima alcanzada fue del 65 % de la resistencia máxima a tracción del tendón. Como se ha mencionado anteriormente, las cuñas interiores generan una presión radial máxima en el inicio del anclaje que puede provocar el fallo del conjunto de manera prematura. La Figura 8.7 (superior) muestra la ruptura de la probeta M01. Se puede apreciar como las cuñas interiores se clavaron en el tendón *CFRP* debido a la presión radial ejercida, causando la rotura intralaminar que provocó la delaminación del material compuesto en un valor inferior a su capacidad máxima. Para reducir este efecto, los sistemas M02 y M03 incorporaron un material de interfase entre las cuñas interiores y el tendón *CFRP*. Este material adicional debe ser más elástico y deformable que el acero de las cuñas interiores con el objetivo de suavizar las tensiones que se generan en el inicio del anclaje y poder agotar la capacidad del material compuesto a tracción.



**Figura 8.7:** Detalle del daño local producido por la presión radial de las cuñas interiores de la probeta M01 (arriba) y rotura de la probeta M02 (abajo).

En los sistemas M02 y M03 se introdujo un perfil de cobre de 130 mm de longitud y 0.3 mm y 1 mm de espesor respectivamente. Con la configuración M02, el conjunto alcanzó el

75 % de la resistencia a tracción del tendón *CFRP*. El cobre usado en la interfase permitió relajar el pico de tensiones generado en el inicio del anclaje permitiendo alcanzar cargas superiores. Como se puede apreciar en la Figura 8.7 (inferior), la rotura del tendón muestra un mayor número de fibras rotas por tracción, disminuyendo el número de fibras rotas por causa de la presión radial. Cabe destacar que al usar pequeños espesores en el material de interfase, éste queda totalmente dañado por la presión radial ejercida por las cuñas interiores. En este sentido, la configuración M03 dispuso de un espesor en el material de interfase superior. En este caso, el sistema permitió alcanzar el 70 % de la resistencia a tracción del tendón. El material de interfase de cobre resultó totalmente dañado y plastificado por la presión radial de las cuñas interiores. En los resultados obtenidos con el sistema M03, se puede apreciar grandes desplazamientos sin incremento de carga debido a la plastificación del material en la interfase. Como se puede apreciar en los resultados experimentales, los anclajes de sujeción mecánica restan capacidad a los tendones de material compuesto provocando roturas del tendón prematuras en la zona del anclaje.

### 8.3.2. Anclajes de sujeción adhesiva

A diferencia de los anclajes de sujeción mecánica para tendones *CFRP*, hay pocas investigaciones relacionadas con los anclajes de sujeción adhesiva. Los trabajos realizados hasta el momento estudian el efecto del tesado hasta rotura del conjunto, sin detallar el estado tensional interno de los anclajes. Mediante la evidencia científica, se estudió el comportamiento de los anclajes de sujeción adhesiva durante el proceso de tesado y se analizó la distribución de esfuerzos internos al traccionar el conjunto. Para ello, se realizaron pruebas de carga en anclajes circulares para tendones *CFRP*. Los anclajes estaban formados por un casquillo de acero exterior en el cual se insertó un tendón *CFRP*. Entre el casquillo y el tendón se distribuyó un adhesivo con el objetivo de garantizar la perfecta unión entre ambos materiales. El estudio se realizó según especificaciones de la norma ACI 440.3R-04 B.10 [2].

La Tabla 8.2 describe los adhesivos utilizados en esta investigación. Los adhesivos utilizados son de tipo bicomponente basados en epoxi, poliuretano o metacrilato. Son adhesivos estructurales de altas propiedades mecánicas destinados al sector aeronáutico, industrial, transporte, construcción, etc. Debido al elevado número de geometrías, se estableció un criterio de nomenclatura para las probetas. Las dos primeras cifras corresponden al tipo de geometría, las dos cifras siguientes corresponden al tipo de adhesivo y las dos últimas cifras corresponden al número de la probeta. Se llevaron a cabo varios ensayos cuasi-estáticos utilizando diferentes geometrías de anclaje. Los parámetros estudiados fueron la longitud del anclaje y el espesor de adhesivo. La Tabla 8.2 muestra las dimensiones de adhesión y el número de probetas ensayas.

Uno de los objetivos de la investigación fue conocer la distribución de la tensión tangencial en la superficie de unión entre el material compuesto y el adhesivo. Dado que no es viable instrumentar la superficie de unión directamente, una de las probetas fue instrumentada con galgas extensiométricas de  $350 \Omega$  compensadas térmicamente con una conexión de cuarto de puente dispuestas longitudinalmente en el elemento exterior adherido. A partir de los valores experimentales de deformación y considerando la hipótesis de tensión uniaxial en el elemento

		G09a	G09b	G09c	G10	G11
	$\varnothing_{tendon}$ (mm)	8	8	8	8	8
	$\varnothing_{casquillo\ interno}$ (mm)	14	20	24	14	14
	$\varnothing_{casquillo\ externo}$ (mm)	30	30	30	30	30
	Longitud $L$ (mm)	200	200	200	300	460
Adhesivo 01	Basf MBrace Primer	3	1	1	-	1
Adhesivo 02	Basf MBrace Adhesivo	1	-	-	-	-
Adhesivo 03	ITW Plexus MA300	1	-	-	1	-
Adhesivo 04	ITW Plexus MA420	-	-	-	1	-
Adhesivo 05	Resoltech 3050CT y 3054CT	1	-	-	-	-
Adhesivo 06	Huntsman Araldite 2011	1	-	-	-	-
Adhesivo 07	Huntsman Araldite 2029	1	-	-	-	-
Adhesivo 08	Resoltech 3040 y 3045	1	-	-	-	-
Adhesivo 09	Scott Bader Crestabond M1-05	1	-	-	-	-

**Tabla 8.2:** Nomenclatura de los adhesivos utilizados en la campaña experimental, geometrías y número de anclajes ensayados.

exterior adherido, es posible determinar el valor de carga que se transfiere al adhesivo a través de un esfuerzo cortante. Este esfuerzo se obtuvo analizando la zona de análisis por tramos y considerando un valor medio de tensión tangencial para cada tramo. A partir de los puntos centrales de cada tramo, se obtuvieron los valores de tensión tangencial en la superficie de unión del elemento exterior.

La construcción de los especímenes se realizó en un ambiente controlado de laboratorio y la dificultad del proceso fue función de la viscosidad del adhesivo. En primer lugar, se limpiaron las impurezas del casquillo exterior de acero con disolvente. Las barras de CFRP se proporcionan con un film protector que debe ser eliminado. Ningún otro tratamiento es requerido para los tendones. En el caso de las probetas con adhesivos de alta viscosidad, la colocación del adhesivo debe realizarse mediante una pistola de inyección suministrada por el fabricante. La alta viscosidad del adhesivo obliga a introducir el tendón dentro del anclaje posteriormente al llenado. Este proceso da lugar a burbujas de aire que se forman durante el proceso de construcción. Por otro lado, la construcción de las probetas con adhesivos de baja viscosidad fue mucho más sencilla obteniendo una mayor precisión en el espesor del adhesivo. La colocación del tendón *CFRP* se realizó previamente al llenado con el adhesivo. Debido a la baja viscosidad, la colocación de los adhesivos se realizó mediante llenado por gravedad. La formación de burbujas fue menor y la precisión de la geometría deseada fue más elevada. De acuerdo con las especificaciones de cada fabricante, únicamente el adhesivo 01 fue considerado de baja viscosidad. La Figura 8.8 muestra la configuración de ensayo experimental para la evaluación de anclajes de sujeción adhesiva para tendones de material compuesto.

En todos los casos se produjo una rotura de tipo frágil en la superficie de adhesión del elemento interior, provocando el arrancamiento de la barra de *CFRP* y una caída súbita de la capacidad portante. La poca plasticidad de la unión puede ser un inconveniente dado que no existe una visualización del proceso de deformación de la pieza. El sistema parece estar soportando bien la carga y de forma súbita cede. En la Figura 8.9 se observa el modo de rotura típico de los anclajes circulares de sujeción adhesiva.

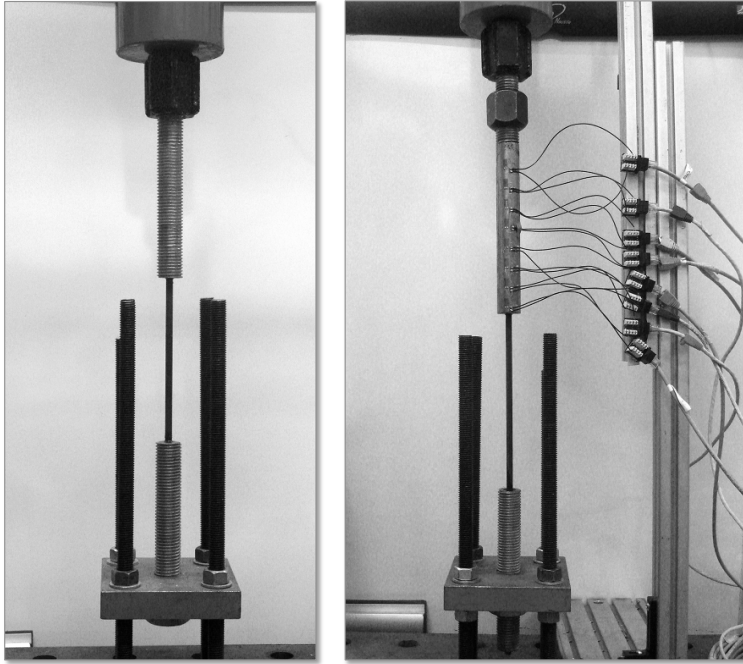


Figura 8.8: Configuración de ensayo experimental de los anclajes de geometría circular.

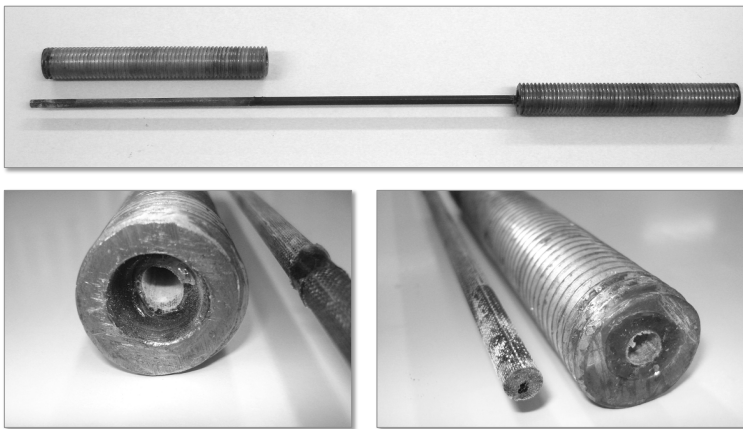


Figura 8.9: Rotura producida en uno de los anclajes circulares.  
Deslizamiento del tendón CFRP respecto el adhesivo.

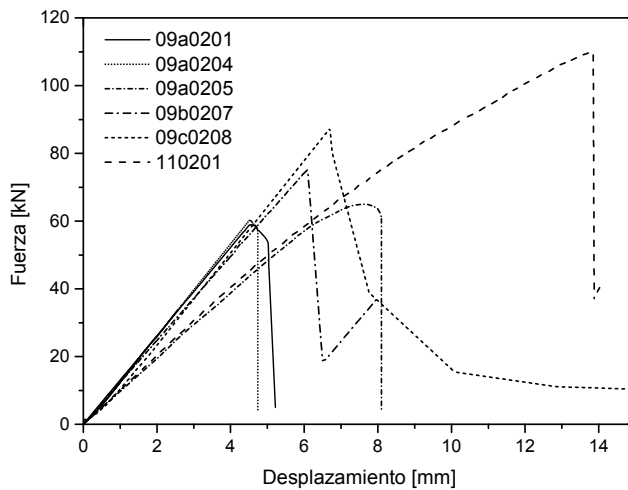
Se estudiaron varios adhesivos para ser utilizados en los anclajes circulares de sujeción adhesiva. Todos los adhesivos mostraron un comportamiento muy parecido entre ellos, aunque cada uno alcanzó su máxima resistencia de adhesión en diferentes valores de carga (véase Tabla 8.3). No obstante, se centró mayor atención en los anclajes con adhesivo 01 debido a su baja rigidez y la posibilidad de alcanzar mayores cargas de tesado. Para dicho adhesivo



se analizaron diferentes espesores y longitudes de unión. Como puede observarse en la Figura 8.10, la curva fuerza-desplazamiento de las probetas con adhesivo 01 mediante el sistema de tracción *pull-pull*, presentaron un comportamiento prácticamente lineal hasta el punto de rotura, el cual ocurrió bruscamente. Se puede apreciar que los especímenes con un mayor espesor de adhesivo alcanzaron una carga última superior. Este hecho puede ser debido a una mayor uniformidad de la distribución de tensiones al aumentar el espesor del adhesivo. Además, con el mismo espesor de adhesivo, se alcanzaron mayores cargas de tesado con mayores longitudes de adhesión. Esto indica que existe una capacidad portante residual una vez se ha iniciado el daño en la unión adherida, que permite alcanzar cargas superiores. Por otra parte, la rigidez del conjunto es muy similar entre todas las geometrías con adhesivo 01.

Probeta	Fuerza máxima (kN)	Probeta	Fuerza máxima (kN)	Probeta	Fuerza máxima (kN)
09a0101	58,94	110101	110,70	09a0701	72,77
09a0104	60,25	09a0201	37,70	09a0801	73,85
09a0105	64,97	09a0301	84,70	09a0901	43,72
09b0107	75,10	09a0501	49,53	100301	107,86
09c0108	87,24	09a0601	59,02	100401	78,01

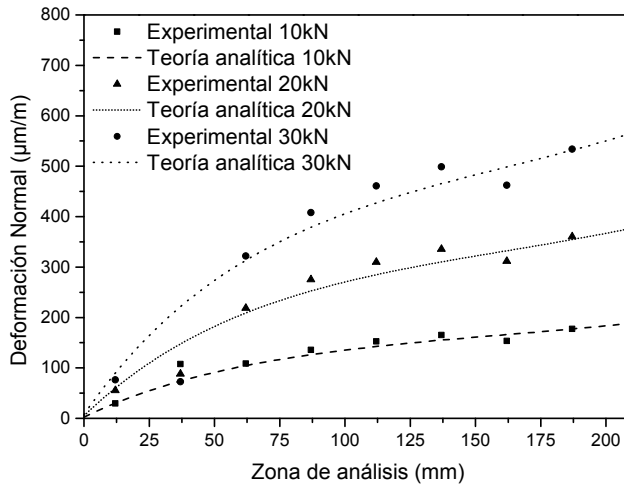
**Tabla 8.3:** Carga máxima de los anclajes circulares.



**Figura 8.10:** Diagrama fuerza-desplazamiento de las probetas con adhesivo 01.

La probeta 09c0108 fue instrumentada exteriormente con galgas extensiométricas para conocer la distribución de tensiones en la unión adherida. Mediante la formulación analítica para anclajes adheridos circulares, es posible conocer el estado tensional en el exterior del casquillo de acero. La Figura 8.11 presenta la distribución de tensión normal a 10, 20 y 30 kN obtenida mediante la formulación analítica y experimentalmente. En ella se observa que la formulación analítica predice satisfactoriamente los valores experimentales. No obstante, no fue posible realizar comparaciones a mayores cargas de tesado debido a que se obtuvieron errores en algunas galgas extensiométricas. Puesto que la formulación analítica permitió

predecir el estado tensional en el exterior del casquillo satisfactoriamente, se utilizó dicha formulación para conocer el estado tensional de los anclajes con diferente espesor con adhesivo 01 para la carga de rotura.



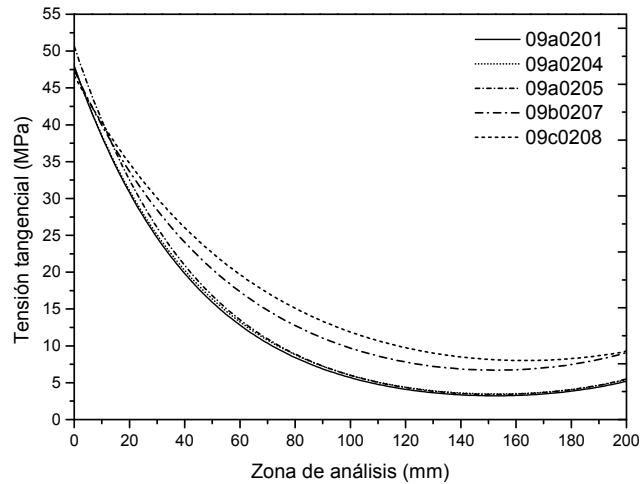
**Figura 8.11:** Distribución de tensión normal en el exterior del casquillo de acero de la probeta 09c0108.

Como muestra la Figura 8.12, el fallo en la unión se produce cuando la tensión tangencial en la superficie de unión llega a un valor máximo admisible. Estos resultados permiten establecer un criterio de rotura para las uniones circulares sometidas a tracción. Al alcanzar un valor crítico de tensión tangencial en la unión adherida, se produce la extracción de la barra *CFRP* respecto al adhesivo. A través de la formulación analítica y con los valores de carga máxima de los ensayos experimentales, se ha determinado dicho valor de tensión máxima admisible con una diferencia relativa inferior al 5%. Por otra parte, el aumento de carga que se produce para espesores de adhesivo mayor, se debe a que la distribución de tensión tangencial presenta un gradiente menor. Cuanto menor sea el espesor del adhesivo, mayor gradiente, y, por lo tanto, menor carga es capaz de transferir.

## 8.4. Conclusiones

A pesar de las investigaciones realizadas durante las últimas décadas, no hay un anclaje suficientemente eficiente para ser utilizado con tendones *FRP*. Ambos tipos de anclaje (mecánico y adhesivo) muestran un comportamiento prácticamente elástico y lineal durante el proceso de tensado hasta el fallo brusco del conjunto. Los modos de fallo son prematuros, ya sea en el tendón en anclajes de sujeción mecánica debido a elevadas tensiones en el inicio del anclaje, o en la superficie de unión en los anclajes de sujeción adhesiva.

El uso de anclajes de sujeción mecánica ofrece la posibilidad de un sencillo montaje basado en los actuales sistemas para tendones de acero. De los anclajes de sujeción mecánica se puede destacar lo siguiente:



**Figura 8.12:** Distribución de tensión tangencial en la unión adherida exterior para las probetas con adhesivo 01 de diferente espesor.

- Durante el proceso de tesado las fuerzas producidas por las cuñas interiores generaran un concentrador de tensiones en el inicio del anclaje provocando el colapso de la matriz del material compuesto y el fallo prematuro del conjunto.
- La incorporación de un material en la interfase entre las cuñas interiores y el tendón *CFRP* mejora el comportamiento del conjunto. Mayores valores de tesado pueden ser alcanzados debido a la reducción del pico de tensión que se genera en el inicio del anclaje y una mejor distribución de tensiones proporcionada por el material en la interfase. No obstante, el efecto de la presión radial impide agotar la totalidad de la capacidad de la resistencia a tracción del tendón *CFRP*.

Los anclajes de sujeción adhesiva permiten el ensamblaje del conjunto antes de ser tesados. No obstante, se requiere un tiempo de curado para que el adhesivo alcance las propiedades deseadas. De los anclajes de sujeción adhesiva se puede destacar lo siguiente:

- Experimentalmente se ha observado que la rotura de la unión es de tipo frágil. Cuando la distribución de tensiones tangenciales en la unión adhesiva llega a un valor pico crítico, se produce una rotura frágil que se propaga de forma inmediata. Al alcanzar el valor límite de la tensión tangencial se localiza el daño y se produce la separación física entre el material compuesto y el adhesivo. Esta separación se desplaza a lo largo de toda la superficie de contacto y provoca el despegue en la interfase. Después de que la carga ha cedido de forma súbita se produce el arrancamiento del material compuesto.
- El espesor del adhesivo influye en los valores de la carga máxima que es capaz de soportar las uniones adheridas. A mayor espesor, mayor capacidad de carga.
- La formulación analítica es capaz de predecir la distribución de tensiones tangenciales a lo largo de las superficies de contacto. El resultado experimental queda bien ajustado con la formulación analítica.

- Finalmente, conociendo la geometría del anclaje y el valor crítico de la tensión tangencial en la interfase, la formulación analítica puede establecer un criterio de rotura del anclaje bajo sollicitación de tracción cuando se usan adhesivos con muy poca plasticidad. Las diferencias relativas obtenidas de la tensión máxima admisible en los casos estudiados han sido inferiores al 5%.

## 8.5. Líneas futuras

En el presente capítulo se han expuesto los resultados del estudio del comportamiento de los anclajes de sujeción mecánica y adhesiva a corto plazo. No obstante, es necesario el estudio a largo plazo del comportamiento estructural del anclaje. En el caso de los anclajes de sujeción adhesiva es especialmente importante ya que los materiales involucrados son susceptibles de sufrir fluencia.

Por otra parte, también es importante el comportamiento a fatiga de los anclajes. Aunque los materiales compuestos suelen mostrar un buen comportamiento a la fatiga, el conjunto debe ser estudiado. En el caso de los anclajes de sujeción adhesiva, la resistencia a fatiga del adhesivo es un parámetro de alta importancia que determinará el comportamiento del anclaje. Actualmente, en estructuras pretensadas, los tendones son tesados al 60% de su resistencia máxima a tracción. Por este motivo la resistencia a fatiga de los anclajes debe ser estudiada para valores de tesado similares bajo diferentes amplitudes. Todo esto es motivo de futuras investigaciones que ya están en desarrollo.

Finalmente, debido al elevado coste que implica la realización de ensayos experimentales, se están llevando a cabo la investigación del comportamiento de los anclajes a nivel estático y dinámico mediante el método de los elementos finitos.

**Agradecimientos** El autor desea agradecer la ayuda obtenida mediante la beca FPI-UPC de la Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech - Document CG 23/11/2009, y especialmente a BASF Construction Chemicals España, S.L. por la donación de las barras de *CFRP* y los componentes adhesivos, y a VSL CTT Stronhold el apoyo durante el trabajo realizado.

## Bibliografía seleccionada

A continuación se presentan las normativas y guías de diseño que se han establecido para anclajes de tendones *FRP*:

- La asociación Canadian Standards Association elaboró las normas CAN/SA S6-00 y CAN/CSA S806-02 para el uso de tendones de pretesar en puentes y edificios, respectivamente.
- En Europa, la unificación para las directrices de utilización de materiales compuestos en la ingeniería civil está actualmente en desarrollo. En 1996, un conjunto de empresas

desarrollo un código práctico para el diseño de estructuras con materiales compuestos: *Structural Design of Polymer Composites: Eurocomp Design Code and Background Document* con la finalidad de formar la base para un futuro Eurocódigo.

Las actividades más recientes en Europa han sido resumidas en el trabajo de Matthys y Taerwe [15]:

- TAERWE, L. MATTHYS S. FRP for Concrete Construction: Activities in Europe. *Concrete International*, 21 (1999), 33-36.

Además, la norma ACI ha establecido una serie de documentos referentes a la utilización de materiales compuestos en estructuras de hormigón:

- 440.4R-04: *Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons.*
- 440.1R-06: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars.*
- 440.7R-10: *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Systems for Strengthening Unreinforced Masonry Structures.*
- 440R-07: *Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.*

## Referencias

- [1] ACI 440.7R-07. *Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for concrete structures.* American Concrete Institute, 2007.
- [2] ACI COMMITTEE 440. *ACI 440.3R-04 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthen.* American Concrete Institute, 2004.
- [3] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK. *ASM Handbook Volume 13A Corrosion.* American Society for Materials, 2003.
- [4] BUDELMANN, H., AND ROSTÁSY, F. S. Creep Rupture Behavior of FRP Elements for Prestressed Concrete - Phenomenon, Results and Forecast Models. *Special Publication 138* (1993), 87–100.
- [5] CAMPBELL, T., SHRIVE, N. G., SOUDKI, K. A., KEATLEY, J., AND REDA TAHA, M. M. Design and evaluation of a wedge-type anchor for fibre reinforced polymer tendons. *NRC Canada 992* (2000), 985–992.
- [6] GOLAND, M., AND REISSNER, E. The stresses in cemented joint. *Journal of Applied Mechanics* (1944), 17–27.
- [7] MERTOL, H. C., RIZKALLA, S. H., SCOTT, P., LEES, J. M., AND EL-HACHA, R. Durability of Concrete Beams Prestressed with CFRP. *ACI Special Publication 245* (2007), 1–20.
- [8] NANNI, A., BAKIS, C. E., O'NEIL, E. F., AND DIXON, T. O. Performance of FRP tendon anchor systems for prestressing concrete structures. *PCI Journal Jan-Feb* (1996), 34–44.
- [9] PINCHEIRA, J. A., AND WOYAK, J. Anchorage of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Tendons Using Cold-Swaged Sleeves. *PCI Journal Nov-Dec* (2001), 100–111.
- [10] PUIGVERT, F., AND GIL, L. *Patente: Anclaje, sistema de fijación y procedimiento para postensar armaduras activas de material compuesto.* Número: P201230865. 2012.

- [11] SAYED-AHMED, Y., E., AND SHRIVE, N. G. A new steel anchorage system for post-tensioning applications using carbon fibre reinforced plastic tendons. *NRC Canada* 25 (1998), 113–127.
- [12] SCHMIDT, J., TÄLJSTEN, B., BENNITZ, A., AND PEDERSEN, H. FRP tendon anchorage in post-tensioned concrete structures. *Concrete repair, rehabilitation and retrofitting* (2009), 1181–1186.
- [13] SCHMIDT, J. W., BENNITZ, A., TÄLJSTEN, B., GOLTERMANN, P., AND PEDERSEN, H. Mechanical anchorage of FRP tendons - A literature review. *Construction and Building Materials* 32 (2012), 110–121.
- [14] SMITH, H. Adhesive-bonded double-lap joints. Tech. rep., 1973.
- [15] TAERWE, L., AND MATTHY, S. FRP for Concrete Construction: Activities in Europe. *Concrete international* 21 (1999), 33–36.
- [16] TAHA, M. R., AND SHRIVE, N. G. New Concrete Anchors for Carbon Fiber-Reinforced Polymer Post-Tensioning Tendons - Part 1 : State-of-the-Art Review / Design. *Aci Structural Journal*, 100 (2003), 86–95.
- [17] TSAI, M., OPLINGER, D., AND MORTON, J. Improved theoretical solutions for adhesive lap joints. *International Journal of Solids and Structures* 35, 12 (1998), 1163–1185.
- [18] VOLKERSEN, O. Die Niet kraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschen querschnitten. *Luftfahrtforschung* 15 (1938), 41–47.
- [19] ZHANG, B., AND BENMOKRANE, B. Design and evaluation of a new bond-type anchorage system for fiber reinforced polymer tendons. *NRC Canada* 26 (2004), 14–26.