



E.T.S. DE INGENIERÍA EN EDIFICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN EDIFICACIÓN. ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN

**REFUERZO A FLEXIÓN DE VIGAS
DE HORMIGÓN MEDIANTE POLÍMEROS
REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO**

JAVIER LÓPEZ MOLINA

DIRECTOR:

D. FERNANDO FARGUETA CERDÁ

Valencia, Diciembre de 2012

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar indicar mi agradecimiento a mi director del trabajo fin de máster D. Fernando Fargueta Cerdá por compartir conmigo sus conocimientos y su amplia experiencia en la materia, por su gran contribución profesional y personal.

Quiero agradecer especialmente a muchas personas que también han colaborado aportando su apoyo, paciencia y motivación para que este trabajo llegue a su fin, a Lucía, a mi familia, a mis amigos y compañeros de la escuela, y a mis compañeros de trabajo.

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN	6
1.1 - MOTIVACIÓN.....	7
1.2 - OBJETIVOS	7
CAPÍTULO 2 - MATERIALES COMPUESTOS	9
2.1 - ANTECEDENTES	10
2.2 - LOS MATERIALES COMPUESTOS	15
2.2.1 - Materiales compuestos de matriz polimérica	17
2.2.1.1 - Descripción de las matrices.....	17
2.2.1.2 - Descripción de las fibras.....	19
2.2.1.3 - Comparación de las fibras	22
2.3 - DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO.....	26
2.3.1 - Materiales prefabricados.....	27
2.3.2 - Materiales de tejidos de fibras.....	30
2.3.3 - Resinas epoxi.....	32
2.3.4 - Fabricación del producto. La pultrusión	35
2.3.5 - Campos de aplicación de los refuerzos FRP	41
2.3.5.1 - Refuerzo a flexión	42
2.3.5.2 - Refuerzo a cortante.....	44
2.3.5.3 - Refuerzo por confinamiento.....	46
2.3.5.4 - Refuerzo de muros.....	47
CAPÍTULO 3 - ENSAYOS EN MATERIALES COMPUESTOS.....	49
3.1 - INTRODUCCIÓN.....	50
3.2 - CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES	51
3.2.1 - Caracterización de las fibras	51
3.2.2 - Caracterización de matrices y adhesivos.....	52
3.3 - CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.....	52
3.3.1 - Determinación de la densidad y volumen de fibra	52
3.3.2 - Propiedades mecánicas a tracción	54
3.3.3 - Propiedades mecánicas a compresión.....	56
3.3.4 - Propiedades mecánicas a flexión	57
3.3.5 - Propiedades mecánicas a cortadura plana	58
3.3.6 - Resistencia interlaminar a corte.....	59
3.4 - CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA	59
3.4.1 - Sistemas de refuerzo.....	60
3.4.2 - Preparación y geometría de las probetas.....	60
3.4.3 - Resultados.....	62

CAPÍTULO 4 - CRITERIOS DE DISEÑO Y CÁLCULO	66
4.1 - APLICACIONES Y USO	67
4.2 - FILOSOFÍA DEL DISEÑO	68
4.2.1 - ACI 440	68
4.2.1.1 - Límites de resistencia.....	68
4.2.1.2 - Resistencia al fuego de la estructura.....	69
4.2.1.3 - Selección de sistema de refuerzo.....	70
4.2.1.4 - Propiedades de los materiales en el diseño.....	71
4.2.2 - Bulletin 14 FIB	71
4.2.2.1 - Requerimientos del diseño	71
4.2.2.2 - Verificación del estado límite de servicio (ELS).....	72
4.2.2.3 - Verificación del estado límite último (ELU)	72
4.2.3 – Comparativo ACI – FIB	75
4.3 - CRITERIOS PARA REFUERZO A FLEXIÓN DE VIGAS	76
4.3.1 - ACI 440	76
4.3.1.1 - Hipótesis	77
4.3.1.2 - Resistencia nominal.....	78
4.3.1.3 - Ductilidad.....	79
4.3.1.4 - Capacidad de servicio	81
4.3.1.5 - Aplicación a una sección rectangular reforzada.....	81
4.3.1.6 - Análisis de los criterios ACI.....	83
4.3.2 - Bulletin 14 FIB	85
4.3.2.1 - Modos de fallo. ELU	85
4.3.2.2 - Análisis de ELU	89
4.3.2.3 - Requerimientos de ductilidad	101
4.3.2.4 - Estado límite de servicio	102
4.3.2.5 - Análisis de los criterios FIB	106
4.3.3 - Comparativo de criterios ACI-FIB	107
4.4 - CRITERIOS PARA REFUERZO A CORTANTE DE VIGAS	111
4.4.1 - ACI 440	111
4.4.1.1 - Consideraciones generales.....	111
4.4.1.2 - Esquemas de revestimiento.....	111
4.4.1.3 - Resistencia nominal a cortante	112
4.4.1.4 - Contribución del sistema CFRP a cortante	112
4.4.2 - Bulletin 14 FIB	115
4.4.2.1 - Introducción.....	115

4.4.2.2 - Diseño del modelo ELU	117
4.4.2.3 - Estado límite de servicio	121
4.4.3 - Comparativo de criterios ACI-FIB	121
CAPÍTULO 5 - CONSIDERACIONES ESPECIALES DE DISEÑO Y EFECTOS DEL ENTORNO.....	124
5.1 - INTRODUCCIÓN.....	125
5.2 - RESISTENCIA MÍNIMA DEL SUSTRATO DE HORMIGÓN	125
5.3 - TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA	126
5.4 - DISEÑO Y PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO.....	126
5.4.1 - Elementos reforzados sin protección al fuego	127
5.4.2 - Elementos reforzados con protección al fuego.....	127
5.5 - HUMEDAD	128
5.5.1 - Efecto de la absorción de agua en el FRP.....	128
5.5.2 - Durabilidad de un sistema Hormigón – FRP	128
5.6 - EFECTOS DE LA TEMPERATURA	129
5.6.1 - Hielo-Deshielo	129
5.6.2 - Comportamiento del adhesivo ante altas y bajas temperaturas	130
5.7 - EXPOSICIÓN A LA LUZ UV	130
5.8 - ALCALINIDAD-ACIDEZ	132
5.9 - CORROSIÓN Y FATIGA.....	132
5.10 - IMPACTO	133
5.11 - SEÍSMO.....	133
CAPÍTULO 6 - EJECUCIÓN EN OBRA.....	134
6.1 - INTRODUCCIÓN.....	135
6.2 - REFUERZO CON LAMINADO. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	136
6.2.1 - Consideraciones previas	136
6.2.2 - Consideraciones para una buena adhesión.....	137
6.2.3 - Medidas de seguridad en la obra	137
6.2.4 - Preparación de la superficie	138
6.2.5 - Resina epoxi. Mezclado.....	139
6.2.6 - Aplicación del refuerzo de CFRP	140
6.2.7 - Recubrimiento de los laminados.....	144
6.2.8 - Inspección	145
6.3 - REFUERZO CON LAMINADO EN L. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	146
6.3.1 - Consideraciones previas	146
6.3.2 - Preparación del soporte.....	146

6.3.3 - Resina epoxi. Mezclado.....	148
6.3.4 - Aplicación del refuerzo en L	149
6.4 - REFUERZO CON TEJIDO. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	151
6.4.1 - Consideraciones previas	151
6.4.2 - Consideraciones para una buena adhesión.....	152
6.4.3 - Medidas de seguridad en la obra	152
6.4.4 - Preparación de la superficie	153
6.4.5 - Resina. Mezclado	154
6.4.6 - Aplicación del refuerzo de CFRP	154
6.4.7 - Método seco	155
6.4.8 - Método húmedo	157
6.4.9 - Recubrimiento con pintura	162
6.4.10 - Curado	162
6.4.11 - Inspección	162
6.5 - CONTROL DE CALIDAD.....	163
6.5.1 - Objeto.....	163
6.5.2 - Consideraciones previas	164
6.5.3 - Control de recepción de materiales	164
6.5.4 - Control de los acopios	165
6.5.5 - Control de ejecución	165
6.5.6 - Control final de obra.....	168
6.5.7 - Tablas de comprobación en obra.....	171
CAPÍTULO 7 - APLICACIÓN DE LAS GUÍAS DE DISEÑO PARA EL CÁLCULO DE UN REFUERZO A FLEXIÓN EN VIGA.....	177
7.1 - PLANTEAMIENTO DEL CASO PRÁCTICO	178
7.1.1 - Situación inicial.....	178
7.1.2 - Comprobación de la necesidad de refuerzo	181
7.2 - DISEÑO DE REFUERZO A FLEXIÓN MEDIANTE ACI 440	183
7.3 - COMPROBACIÓN A ESFUERZO CORTANTE SEGÚN GUÍA ACI 440	197
7.3.1 - Planteamiento del problema	197
7.3.2 - Cálculo de la resistencia a cortante.....	198
7.4 - DISEÑO DE REFUERZO A FLEXIÓN MEDIANTE Bulletin 14, FIB	201
7.5 - COMPROBACIÓN A ESFUERZO CORTANTE SEGÚN Bulletin 14, FIB	212
7.5.1 - Planteamiento del problema	212
7.5.2 - Cálculo de la resistencia a cortante.....	213
7.6 - NOTACIÓN	215

7.6.1 - Notación ACI 440	215
7.6.2 - Notación Bulletin 14, FIB.....	217
CAPÍTULO 8 - CONCLUSIONES	220
8.1 - SOBRE LA APLICACIÓN DE CFRP EN EL REFUERZO DE ESTRUCTURAS	221
8.2 - SOBRE LOS RESULTADOS DEL CASO PRÁCTICO	222
CAPÍTULO 9 - LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	226
BIBLIOGRAFÍA.....	228

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 - MOTIVACIÓN

El presente trabajo se enmarca dentro del Trabajo Final del Máster en Edificación, especialidad Tecnología, cursado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación, de la Universidad Politécnica de Valencia.

1.2 - OBJETIVOS

La aplicación de materiales compuestos en el refuerzo de estructuras de hormigón, metálicas, de madera, de mampostería,... comienza a constituir una auténtica alternativa al sistema de refuerzo convencional ya sea mediante encolado de chapas de acero, armaduras colocadas a posteriori o perfiles añadidos.

El refuerzo de estructuras de hormigón armado y pretensado aplicando materiales compuestos a base de fibras sintéticas y resinas adheridos externamente al sustrato a reforzar ha llegado a ser una realidad como una técnica de ejecución en numerosos países, tanto a esfuerzos de flexión, como a cortante y compresión. Las razones por las que los materiales compuestos se vienen usando en mayor medida como refuerzo de elementos de estructuras de hormigón armado provienen de sus elevadas resistencias mecánicas (comportamiento lineal hasta la rotura), su resistencia a la corrosión y a los agentes químicos, su reducido peso (alrededor de una cuarta parte del acero) lo que facilita su transporte, manejo y puesta en obra (empleando menos medios auxiliares y más ligeros durante cortos períodos de tiempo), gran capacidad de deformación antes de la rotura, buen comportamiento a la fatiga, buenas propiedades dieléctricas, la posibilidad de presentarse en cualquier longitud (eliminación de juntas),...estas propiedades han convertido a estos materiales en una auténtica alternativa frente a otros más convencionales como el acero.

Por todo ello, resulta interesante obtener criterios de diseño de este tipo de refuerzos de aplicación en los campos de la ingeniería y la construcción teniendo en cuenta las excelentes propiedades que presentan los materiales compuestos y su compatibilidad con las estructuras de hormigón armado.

Entre los distintos tipos de fibras (carbono, vidrio, aramida) que pueden servir para este uso, se ha optado por centrar el estudio sobre las fibras de carbono, las más utilizadas en el campo de refuerzos en estructuras de hormigón armado debido a sus características, principalmente por tener su módulo de elasticidad más alto, compatible con la deformación del hormigón.

Como consecuencia de este creciente interés en la aplicación de los materiales compuestos, se han desarrollado en diferentes países guías y recomendaciones de diseño que faciliten la aplicación de esta técnica que continúan en estudio y actualización y que todavía requiere mucho desarrollo hasta que éstas puedan considerarse como norma.

En este trabajo se plantea el estado de conocimiento actual en relación al uso de esta técnica como sistema de refuerzo de estructuras de hormigón armado según las recomendaciones publicadas, en concreto, como aplicación de refuerzo a flexión de vigas. Se presentan los procedimientos de diseño recomendados por dos de las guías de mayor utilización a nivel mundial, como son la guía ACI 440, procedente de los EEUU, y el Bulletin 14 de FIB, guía europea. Con el fin de ilustrar mejor las directrices de cada una de las guías, se presenta un ejemplo práctico de refuerzo a flexión de una viga resuelto mediante el procedimiento de trabajo de ambas guías y donde analizaremos los resultados y extraeremos conclusiones de cada una de ellas.

CAPÍTULO 2

MATERIALES COMPUESTOS

2.1 - ANTECEDENTES

Los materiales compuestos se han venido utilizando desde hace más de 30 años, principalmente en la industria aeronáutica. Posteriormente su campo de aplicación se ha ido extendiendo al mundo del automóvil, telecomunicaciones,... En el presente, la industria de la construcción e ingeniería ha empezado a conocer las bondades y ventajas de nuevos materiales estructurales de naturaleza sintética, provenientes de procesos químicos sofisticados; hoy en día conocidos como materiales compuestos. Son varios los campos de aplicación de los materiales compuestos en la sociedad. Los principales se indican a continuación:

-Electrónica: La mayoría de equipos eléctricos y electrónicos que se utilizan actualmente no serían práctica ni económicamente posibles sin materiales compuestos.

-Construcción: La facilidad de montaje, su resistencia y durabilidad hace que los materiales compuestos, dentro de este campo, encuentren cada vez más aplicaciones.

-Medicina: Los profesionales de este campo dependen de los materiales compuestos, por ejemplo bolsas intravenosas, implantes de silicona, etc. Los distintos tipos de materiales permiten mejorar y en algunos casos prolongar vidas, como es el caso de corazones artificiales, los tubos de aorta, etc.

-Transporte: Para los automóviles y camiones de hoy, los materiales compuestos ofrecen una amplia variedad de beneficios, incluyendo durabilidad, resistencia a la corrosión, ligereza, cristales de seguridad y depósitos de combustible entre otros.

-Aeronáutica: Durante los últimos 50 años, la tecnología aeronáutica ha evolucionado, concediendo a los materiales compuestos un papel muy importante dentro de este campo. La ligereza de los materiales compuestos permite proteger el combustible ante diferencias de presión ambiental.

-Ocio: La amplia gama de propiedades disponibles en estos materiales, los ha hecho formar parte de todo tipo de deportes y equipos acuáticos, terrestres y actividades aéreas. Las ruedas de los patines, que son abrasivas, llevan poliuretano resistente. Las raquetas de tenis se modelan utilizando plásticos reforzados con fibras de vidrio, aramida, carbono, etc. Los esquís están formados por materiales compuestos laminados reforzados especialmente para eliminar las vibraciones a altas velocidades. Una alta tecnología avanzada como esta es la que se aplica a las tablas de surf, sticks de hockey, veleros, canoas y otros equipos.

-Embalajes: Cuando el problema de los embalajes es la resistencia, normalmente los materiales compuestos son la respuesta, algunas veces la única solución.

-Otros mercados: Los materiales compuestos forman parte de todos los mercados gracias a la gran diversidad de propiedades que pueden aportar, como en plataformas para trabajos en altura, líneas de alto voltaje, tanques de combustible de fibra de vidrio altamente resistente a la corrosión, etc.

La distribución sectorial del mercado de los materiales compuestos (figura 2.1) está liderada por el sector del automóvil, el cual consume más de la cuarta parte a

nivel mundial (31% en valor). Los constructores de automóviles tienen imperativos de costes importantes. Por tal razón utilizan masivamente compuestos de gran difusión con resina poliéster reforzada con fibras de vidrio. Estos materiales son menos onerosos que los compuestos de altas prestaciones. Se utilizan para reforzar paneles de revestimiento, deflectores, elementos de carrocería, elementos de defensa y puertas traseras. Son fáciles de mantener, ofreciendo una gran libertad a los diseñadores.

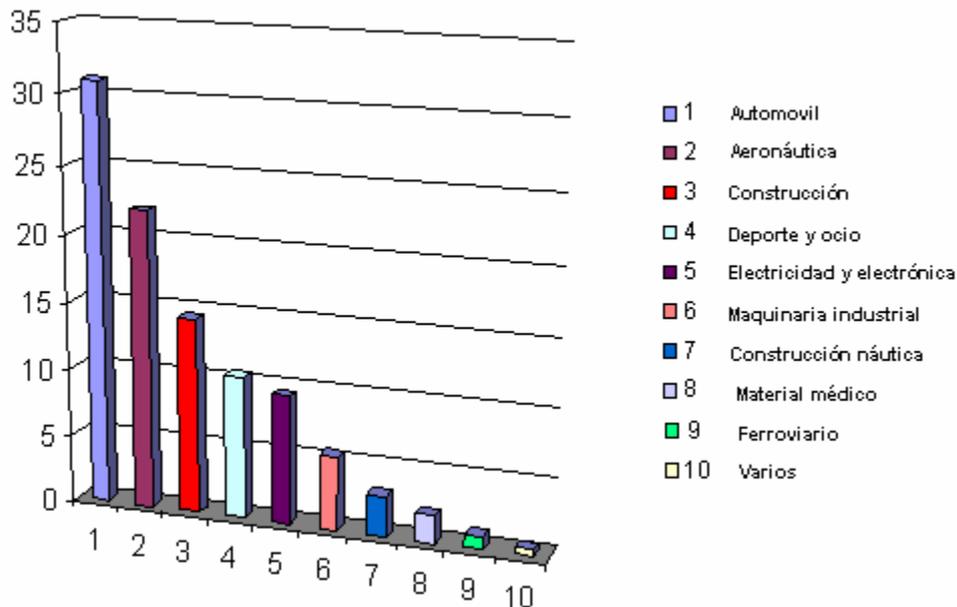


Figura 2.1 Distribución sectorial de la aplicación de los materiales compuestos

La aeronáutica y el ámbito espacial utilizan materiales compuestos de alto rendimiento. En la aeronáutica, los materiales compuestos se han impuesto para fabricar piezas de estructura primarias, gracias a sus prestaciones, sus cualidades de ligereza y su flexibilidad de forma. Los materiales compuestos también tienen muy buena resistencia a la corrosión, lo cual reduce en consecuencia los gastos de mantenimiento. Sin duda que la industria aeronáutica, seguida a cierta distancia por la automoción, ha sido la líder en investigación y desarrollo de materiales compuestos. En esta industria imperan las propiedades de los materiales por encima en muchas ocasiones de su coste, lo que permite ciertas innovaciones que en otros sectores serían impensables.

En la industria de la construcción, los materiales conocidos como tradicionales ejercen una competencia muy fuerte en el sector (hormigones, metales, cerámicas, etc.). Sus prestaciones son muy bien conocidas por todas las figuras que aparecen en la construcción: proyectistas, contratistas, operarios e incluso los propios clientes. Según las estadísticas, este problema se acrecienta en el mercado español. El uso de materiales compuestos en la construcción es mucho menor respecto a lo que se observa en otros países del mundo. La construcción sólo representa un pequeño porcentaje del mercado español de materiales compuestos en volumen (13%), contra

el 35% en Japón, el 32% en Brasil y el 30% de promedio mundial. La flexibilidad de las formas, la resistencia a las variaciones climáticas, el aislamiento térmico y fónico, la resistencia al fuego de algunos materiales compuestos son, no obstante, ventajas muy apreciables.

Comparado con otros sectores productivos, en el sector de la construcción la expansión de los materiales compuestos no ha sido tan generalizada ni tan rápida como se podía esperar. Se trata de un sector cuyo conservadurismo histórico se ha visto reflejado numerosas veces cuando se han tratado de introducir importantes cambios. De todos modos, con el tiempo los materiales compuestos están siendo introducidos, y actualmente son considerados como un tipo de material a tener en cuenta en un futuro muy cercano. De hecho la aparición de nuevas construcciones que han usado algún tipo de material compuesto, es siempre una señal de que la industria de estos materiales va siendo aceptada poco a poco por el sector. Las aplicaciones de los materiales compuestos en el mercado de la construcción varían desde piezas para baños/bañeras y claraboyas, hasta paneles decorativos, paneles para muros cortina, materiales de fachadas y elementos estructurales. Estos materiales son ideales para su uso en el mercado de la construcción por la estabilidad dimensional, alta durabilidad, ligereza, resistencia al impacto y baja inflamabilidad que poseen. Además permiten, mediante una adecuada elección de resinas y aditivos, una alta flexibilidad en el diseño.

Desde las paredes externas y el tejado hasta las paredes internas, existen bastantes aplicaciones para los refuerzos de fibras, tanto visibles como incorporadas a un molde plástico o de cemento, para cualquier tipo de construcción individual o residencia colectiva, edificios educacionales, industriales o agrícolas, oficinas, complejos deportivos, aeropuertos, etc.

Para elementos exteriores de edificios, los materiales compuestos pueden estar presentes en columnas, frontones, bóvedas, cornisas, así como en revestimientos y coberturas para paneles de protección y aislamiento, letreros y láminas translúcidas planas u onduladas (sistemas para fachadas decorativas, para cubiertas, etc.). La renovación de fachadas con la utilización de materiales compuestos de fibras de vidrio contribuye para mejorar la apariencia de edificios, aislantes externos, coberturas de fachadas, donde la estabilidad dimensional y prevención contra hendiduras se hacen necesarias.

Las aplicaciones en cubiertas incluyen la impermeabilización, tejados (con paneles de refuerzo de vidrio y tejas) y acabados de tejados (para drenaje de agua con canalones, caños de escurrimiento y canales).

Al igual que para aplicaciones exteriores, también existen gran número de aplicaciones para elementos interiores de edificios: persianas, argamasa con refuerzo de vidrio, decoración y mobiliario, paneles, sanitarios,...

Para la rehabilitación o para la creación de nuevas infraestructuras, los productos fabricados de materiales compuestos traen numerosas ventajas para diversas aplicaciones, elevada resistencia incluyendo alta durabilidad, peso reducido, resistencia a la corrosión, bajo costo de mantenimiento y de instalación, estabilidad dimensional y flexibilidad en el diseño.

A nivel estructural, la aplicación de materiales compuestos ha abierto un mercado importante en la construcción. Precisamente es este campo y en Estados Unidos donde se encuentran los mayores avances en la investigación del uso de materiales compuestos en la construcción. En su construcción, los materiales compuestos proporcionan alta capacidad de carga con bajo peso de material. Esta característica de los materiales compuestos evita gastos con equipamientos pesados y reduce considerablemente el tiempo de instalación. Los materiales compuestos son también muy durables, muchos no se corroen como el acero ni se pudren como la madera, de modo que los costos de reposición y manutención son significativamente reducidos.

Veamos algunos ejemplos de aplicación de los materiales compuestos en las estructuras de la construcción:

-Restauración de infraestructura: Numerosas reparaciones en todo el mundo se están llevando a cabo mediante preimpregnados carbono/epoxi precuradas o curadas in situ para solventar problemas en estructuras de edificios.

-Refuerzos de materiales compuestos para productos de hormigón, espiga de metal, barras de refuerzos, tendones de postensionado y pre-stress, estructuras fijas...

-Cables "activos": La última generación de ascensores; el modelo presenta cables de aramida, con la mitad de peso, el doble de resistencia y capacidad de monitorización de deformaciones (lo que permite actuar rápidamente ante un posible percance).

-Sistemas de unión "activos": Materiales con memoria de forma. Enfriando cambian la forma y al volver a temperatura ambiente recuperan la forma inicial. Por ejemplo remaches.

- Cimentaciones "activas": Formadas por materiales compuestos electroreológicos, materiales normalmente líquidos pero que con el paso de la corriente eléctrica se vuelven sólidos. En caso de sismo deja de pasar corriente a través del material con lo que algunas cimentaciones se vuelven líquidas y consiguen un conjunto más flexible, con un resultado positivo para movimientos sísmicos.

El presente trabajo se motiva en el estudio de los materiales compuestos, en concreto de polímeros reforzados con fibra de carbono, y su aplicación en el campo del refuerzo de vigas de hormigón armado.

El refuerzo o rehabilitación de estructuras de hormigón armado existentes para resistir nuevas cargas de uso, corrección de daños, deterioro de elementos estructurales o aumento de la ductilidad se han venido resolviendo de forma tradicional con el uso de técnicas constructivas y materiales convencionales. Chapas de acero encoladas exteriormente, encamisados de acero u hormigón y postensados exteriores son algunas de las muchas técnicas tradicionales disponibles.

Los materiales compuestos realizados de fibra en una resina polimérica, también conocidos como polímeros reforzados con fibra (del inglés, *fiber-reinforced polymers FRP*), han emergido como una alternativa a las técnicas y materiales

tradicionales. Para el objetivo de este trabajo, un sistema de FRP se define como todas las fibras y resinas usadas para crear los laminados y tejidos de materiales compuestos, todas las resinas empleadas para adherirlo al sustrato de hormigón armado y todas las capas aplicadas usadas para proteger el material constituyente. En ciertos casos, estas capas pueden tener un uso exclusivamente estético.

Los materiales compuestos FRP son de ligero peso, no corrosivos y presentan alta resistencia a tracción. Además, estos materiales se encuentran disponibles en un rango variado de formas desde laminados realizados en fábrica hasta tejidos de fibras que pueden ser moldeadas in situ para ajustarse a la geometría de la estructura antes de añadir la resina polimérica. El perfil delgado de los sistemas de FRP son comúnmente deseados en aplicaciones donde la estética o la accesibilidad son una preocupación.

El creciente interés en los sistemas FRP para refuerzo de estructuras pueden ser atribuidos a muchos factores. A pesar de que las fibras y resinas utilizadas en los sistemas FRP son relativamente caros en comparación con los refuerzos tradicionales con hormigón y acero, los costos de mano de obra y medios auxiliares para instalar un sistema FRP son generalmente más bajos. Los sistemas FRP pueden también utilizarse en áreas de accesibilidad limitada que dificulte la puesta en práctica de las técnicas tradicionales.

Es cada vez más evidente la aplicación de materiales compuestos desde la última década, ya que tiempo atrás, su aplicación era prácticamente inexistente. Las ventajas de estos materiales se hicieron cada vez más evidentes al empezar a aplicarlos en diversas construcciones sometidas a las acciones de ambientes agresivos, plataformas marinas, depósitos, anclajes al terreno, construcciones no conductivas y no magnéticas, refuerzos de estructuras, armaduras pasivas, armaduras activas, cables, recubrimiento de túneles y pasarelas.

A nivel mundial, la primera estructura mediante láminas encoladas de materiales compuestos FRP con fibra de carbono data de 1.991: el puente Ibach, en Lucerna (Suiza). A lo largo de los siguientes años se continuaron realizando algunos refuerzos en diferentes estructuras, de una manera todavía experimental. En 1.995 se empezó a utilizar este tipo de sistemas de una manera sistemática. Se comenzaron a comercializar los primeros sistemas de refuerzo por parte de distintas empresas, principalmente en Suiza y Alemania.

Tan sólo en estos dos países, el número de realizaciones de refuerzos de estructuras (tanto en puentes como en edificios) con láminas compuestas encoladas asciende a más de doscientas cincuenta, existiendo más de un millar mundialmente (concentradas, fundamentalmente, en Suiza, Alemania, Japón, EE.UU. y Canadá).

La primera aplicación en España del presente sistema de refuerzo se llevó a cabo en el puente del Dragó (Barcelona, 1.996). Consistió en el refuerzo de una serie de vigas del puente que habían sido dañadas. Esta obra recibió el Premio Construmat al sistema más innovador durante la Feria Construmat de 1997. A partir de entonces, este tipo de refuerzo se ha ido popularizando y haciendo práctica común en España, donde ya hay multitud de obras realizadas.

2.2 - LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos o “composites” deben su nombre a que están formados por dos o más materiales, fases o constituyentes, que actúan de manera conjunta y solidaria. Se consiguen, de esta manera, unas prestaciones óptimas en cuanto a comportamiento mecánico, principalmente, que no pueden ser obtenidas en los materiales originales.

Fases o constituyentes:

Matriz: Resina aglomerante para lograr las propiedades deseadas.

Refuerzo: Material específico de relleno que sirve de refuerzo.

Además de matriz y refuerzo existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación.

El refuerzo en el material compuesto aporta la resistencia mecánica, rigidez, dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas. Las características más sobresalientes corresponden a su resistencia a la tracción específica y su elevado módulo de elasticidad. También cabe destacar su alta fragilidad.

La matriz tiene por su parte la misión de transmitir los esfuerzos al refuerzo, hace la función de aglomerante y protección del mismo. A su vez, aporta mayor flexibilidad y proporciona la forma. Tiene menor resistencia que el refuerzo.

REFUERZO	Cerámicas (carburo de silicio, alúmina)
	Metálicas
	Orgánicas (aramida, polietileno)
	Inorgánicas (carbono, vidrio, boro)
MATRICES	Matrices Inorgánicas (cemento, yeso)
	Matrices Termoestables (epoxi, viniléster, poliéster, fenólica)
	Matrices Termoplásticas (polipropileno, policarbonato, acetato)

Tabla 2.2 Materias primas de los materiales compuestos

Aunque esta definición incluye una gran diversidad de materiales (entre los materiales de construcción, el hormigón armado es el ejemplo más habitual), en este trabajo se utiliza el término material compuesto para referirse a los polímeros armados con fibras (*fiber-reinforced polymers, FRP*).

Las características finales de un material compuesto dependen de las propiedades de las fases, de la proporción en que se encuentran cada una de ellas, de la geometría (forma, tamaño, orientación) y grado de dispersión de la fase dispersa en la matriz. Existen clasificaciones de los materiales compuestos en función de cada una de sus fases:

Dependiendo del tipo de matriz empleado

- Compuestos de matriz polimérica (PMC):
 - Resinas de poliéster y resinas epóxicas reforzadas con fibra de vidrio, fibra de carbono o fibra de aramida
- Compuestos de matriz metálica (MMC):
 - Aleaciones de aluminio, titanio y magnesio
- Compuestos de matriz cerámica (CMC):
 - Alúmina, carburo de silicio

Dependiendo del tipo de refuerzo empleado

- Compuestos particulados: Partículas en una matriz
- Compuestos fibrosos: Fibras en una matriz
- Compuestos laminados: Capas o láminas alternadas de las fases

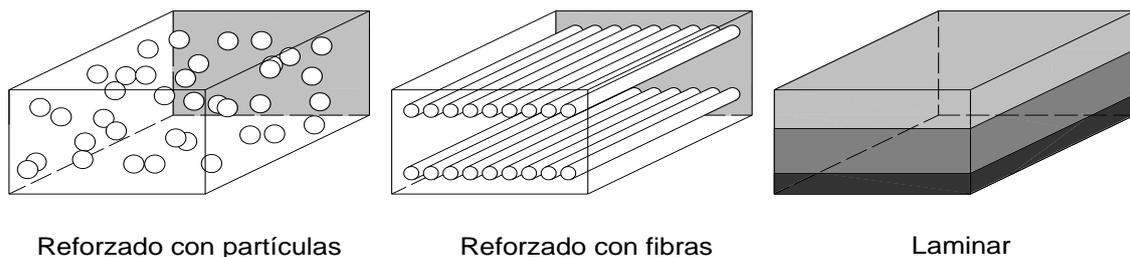


Figura 2.3 Materiales compuestos en función del tipo de refuerzo

Los **compuestos de matriz polimérica** corresponden al grupo de materiales compuestos más empleado en el refuerzo de estructuras de hormigón armado, por lo que a continuación se estudiará de forma más ampliada y analizaremos las características que les proporcionan su aplicación en la práctica de los refuerzos de estructuras.

2.2.1 - Materiales compuestos de matriz polimérica

2.2.1.1 - Descripción de las matrices

La matriz de un material compuesto puede ser de tipo termoestable o de tipo termoplástica, siendo el primero el tipo más común. La función de esta matriz es la protección de las fibras contra la abrasión y corrosión del entorno, unir el conjunto de fibras y distribuir la carga. La matriz tiene una fuerte influencia en muchas características mecánicas del composite, como la resistencia, las propiedades a cortante y a compresión. Las características físicas y químicas de la matriz como la temperatura de fusión y curado, viscosidad y reactividad con las fibras influyen en la elección del proceso de fabricación. De ahí que la apropiada selección del material matriz para un sistema compuesto requiere que todos estos factores sean tenidos en cuenta.

Resinas epoxi, poliéster y viniléster son las matrices poliméricas más comunes utilizadas con las fibras de refuerzo de alto rendimiento. Son polímeros termoestables con buena procesabilidad y buena resistencia química. Las resinas epoxis tienen, en general, mejores propiedades mecánicas que el poliéster y vinilester, y una durabilidad excepcional, en tanto que poliéster y vinilester resultan más económicas.

La función del adhesivo o resina es formar y conformar el material compuesto, y transmitir los esfuerzos rasantes movilizados entre el soporte a reforzar y el esqueleto de fibras resistentes. La tecnología de adhesión estructural aúna química de superficies, química de adhesivos, reología, análisis de tensiones y mecánica de fracturas.

Para una adherencia perfecta es preciso determinar: materiales a adherir, relación y requisitos de mezcla, tecnología de aplicación, temperatura y humedad de curado, técnicas de preparación de superficies, coeficientes de expansión térmica, fluencia, abrasión y resistencia química y viscosidades en adhesivos.

Hay conceptos importantes ligados a la naturaleza de los adhesivos:

- Pot life: tiempo máximo de aplicación tras la mezcla de los dos componentes, debido al inicio de endurecimiento de la resina. Depende de la temperatura ambiente, cantidad de producto mezclado y tipo de resina.
- Tiempo abierto: tiempo máximo tras la aplicación del adhesivo sobre las superficies a unir, para adherirlas.
- Temperatura de transición vítrea: temperatura de pérdida de propiedades, comportamiento vítreo a plástico sin prestaciones mecánicas. Esta temperatura es diferente para distintos polímeros y formulación. Está inversamente ligado a la elasticidad del polímero.

El uso de los adhesivos de naturaleza epoxi, viene motivado, por:

- Perfecta adherencia sobre multitud de soportes, especialmente soportes minerales, hormigón, mampostería, piedra.
- Largo tiempo abierto, facilitando los trabajos de puesta en obra.
- Elevada cohesión interna y adherencia.
- Posibilidad de elastificación, mediante adiciones.

- No forma subproductos tras el endurecimiento.
- Baja retracción en comparación a resinas de poliéster, vinilester y acrílicas.
- Baja fluencia, ni fatiga bajo carga sostenida.
- Formulación con tixotropía para trabajos en vertical.
- Capacidad de unión de soportes irregulares.

La naturaleza empleada en los adhesivos estructurales empleados en construcción es, generalmente, **epoxi**. Según su uso, requiere adición de fillers, fluidificantes, tixotropantes, promotores de adherencia, aditivos y pigmentos, entre otros. Las resinas epoxi bicomponentes deben tener la viscosidad y consistencia de acuerdo al modo de aplicación del refuerzo. En las condiciones atmosféricas de aplicación, las resinas deben ser trabajables y con pot-life (tiempo de endurecimiento dentro del conjunto) compatibles con el formato de presentación del producto.

Los productos planteados como alternativas a los adhesivos epoxi son:

- adhesivos de poliéster, de rápido fraguado, aunque presentan eventuales problemas de retracción, alto coeficiente de expansión térmico, sensibilidad a medios alcalinos y mala adherencia sobre poliéster endurecido.
- adhesivos de vinilester, con problemas de retracción y afectados en gran medida por el contenido de humedad del soporte.

Resina	Densidad, Kg/m ³	Resistencia a Tracción, MPa	Módulo de Elasticidad, MPa	Elongación en Rotura, %	Temperatura Máxima, °C
Poliéster	1.2	50 - 65	3.0	2 - 3	120
Viniléster	1.15	70 - 80	3.5	4 - 6	140
Epoxi	1.1 - 1.4	50 - 90	3.0	2 - 8	120

Tabla 2.4 Comparación de propiedades de resinas según su naturaleza

La selección del tipo de resina debe tener en cuenta el rango de temperaturas durante la aplicación así como una vez la estructura esté en condiciones de servicio. Merece especial atención el punto de transición vítrea de la resina, a partir del cual el producto empieza a perder propiedades mecánicas, con mayores deformaciones y menor rigidez. En general esta temperatura depende de la temperatura de curado, y se sitúa alrededor de 60-82°C.

Adicionalmente a los criterios de resistencia estructural, debe prestarse especial atención a la producción de gases tóxicos durante la combustión, limitándose por parte de la propiedad los valores límites, y exigiéndoselos a los fabricantes.

A continuación se muestran de forma detallada las propiedades mecánicas y físicas de las resinas epoxi, comparándolas con el acero y el hormigón.

Propiedades	Adhesivo Epoxi endurecido	Hormigón	Acero
Densidad, Kg/m ³	1100 – 1700	2350	7800
Módulo Elástico, GPa	0.5 – 2	20 – 50	200
Módulo Cortante, GPa	0.2 – 8	8 – 21	80
Coefficiente Poisson	0.3 – 0.4	0.2	0.3
Resistencia a Tracción, MPa	9 – 30	1 – 4	200 – 600
Resistencia a Cortante, MPa	10 – 30	2 – 5	200 – 600
Resistencia a Compresión, MPa	55 – 110	25 – 150	200 – 600
Elongación en Rotura, %	0.5 – 5	0.015	25
Energía de Fractura, Jm ⁻²	200 – 1000	100	105 – 106
Coefficiente Expansión Térmica	25 - 100	11 – 13	10 – 15
Absorción agua	0.1 – 3	5	0
T ^a Transición Vítre	60 – 80	-	-

Tabla 2.5 Propiedades genéricas de las resinas epoxi

2.2.1.2 - Descripción de las fibras

Este apartado sólo pretende dar una breve descripción de las características que aportan al conjunto del material compuesto las fibras empleadas en el refuerzo de estructuras.

Son tres los tipos de fibras sintéticas que, fundamentalmente, se utilizan para reforzar plásticos:

- Fibras de Carbono
- Fibras de Vidrio
- Fibras Orgánicas

El vidrio es una de las fibras más extendidas para el refuerzo plástico en términos generales, debido en gran parte a que resulta la más económica. Las fibras de carbono y de aramida son muy consistentes, tienen alta resistencia a tracción, alto módulo de elasticidad y baja densidad, por lo que tienen múltiples aplicaciones en el ámbito de la ingeniería y construcción, a pesar de su precio mayor.

Fibras de Carbono

Las fibras de carbono para materiales compuestos provienen principalmente del poliacrilonitrilo (PAN), que es un polímero de tipo acrílico. Las fibras de carbono de alta resistencia y alto módulo de elasticidad tienen un diámetro de 5 a 8µm y constan de pequeñas cristalitas de grafito. En un monocristal de grafito los átomos de carbono se ordenan en redes hexagonales, como se muestra en la figura 2.6:

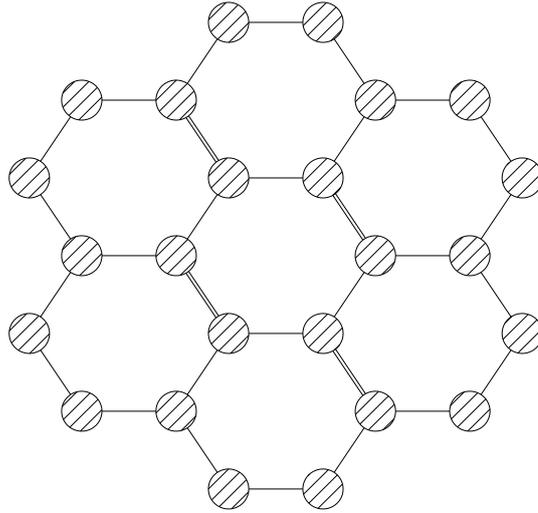


Figura 2.6 Ordenamiento hexagonal de la red de átomos de carbono

El módulo de elasticidad de las fibras de carbono depende del grado de perfección de la orientación, la cual varía considerablemente con las condiciones y proceso de fabricación. Las imperfecciones en orientación dan como resultado, huecos de forma compleja, alargados y paralelos al eje de la fibra. Estos actúan como puntos de concentración de tensiones y puntos débiles que llevan a la reducción de las propiedades.

Las fibras se someten a un proceso de tres etapas para producir fibras con las capas gráficas orientadas preferencialmente paralelas al eje de la fibra:

- a) **Orientación del polímero precursor PAN por estiramiento.** El primer paso es estirar el polímero de forma que quede paralelo a lo que será el eje de la fibra. Posteriormente se oxida a 200-300 °C en aire, un proceso que añade oxígeno a la molécula de PAN y crea la estructura hexagonal. El polímero que antes era blanco, ahora es negro.
- b) **Carbonización de las fibras.** Para conseguir una fibra de alta resistencia se recurre al tratamiento térmico de carbonización: el PAN se calienta a 2000-2500 °C en atmósfera sin oxígeno, se alinean las cadenas del polímero hasta formar hojas de grafeno, cintas delgadísimas y bidimensionales, se eliminan todos los átomos que no sean de carbono y se logra una elevada resistencia a la tracción.
- c) **Grafitización.** Este proceso se lleva a cabo por encima de los 2500°C, se aplica cuando se desea conseguir un aumento del módulo de elasticidad a expensas de la alta resistencia a tracción.

De esta forma, al material obtenido se le pueden variar algunas de sus propiedades, confiriéndoles principalmente alto módulo de elasticidad o alta resistencia, mediante procesos de tratamiento térmico. El material que ha sido calentado de 2000 a 2500°C (carbonización) exhibe la mayor resistencia a la tracción

(820.000 psi , 5.655 MPa), mientras que la fibra de carbono calentada por encima de 2500°C (grafitización) muestra un alto módulo de elasticidad (77.000.000 psi o 531 GPa).

Las fibras de carbono de alta resistencia a tracción se designan como tipo HT. Las fibras de carbono de alto módulo de elasticidad, como tipo HM.

Fibras de Vidrio

Las fibras de vidrio se usan para reforzar matrices plásticas y así formar compuestos estructurados y productos moldeados. El vidrio es la fibra más utilizada en términos generales, siendo la de menor coste. Los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio tienen las siguientes características favorables: buena relación resistencia/peso; buena estabilidad dimensional; buena resistencia al calor, al frío, a la humedad y a la corrosión y buenas propiedades aislantes eléctricas. Las dos clases más importantes de vidrio utilizados para fabricar fibras para materiales compuestos son los **vidrios E** (eléctricos) y los **vidrios S** (de alta resistencia).

Los vidrios E son los más utilizados en la fabricación de fibras continuas. Básicamente, el vidrio E es un vidrio de borosilicato de calcio y aluminio con muy bajo o nulo contenido en potasio y sodio. El vidrio E no modificado tiene una resistencia a la tracción de 3,44 GPa y un módulo de elasticidad de 72,3 GPa.

Los vidrios S tienen una relación resistencia/peso más alta y son más caros que los vidrios E. Estos vidrios se utilizan principalmente en aplicaciones militares y aeroespaciales. Su resistencia a la tracción está sobre los 4,48 GPa y poseen un módulo de elasticidad de unos 85,4 GPa. El diámetro de las fibras comerciales de vidrio E está entre 8 y 15 μm , siendo con frecuencia de 11 μm .

La resistencia y el módulo elástico del vidrio están determinados en principio por la estructura tridimensional de los óxidos constituyentes. A diferencia de las fibras de carbono y aramida (Kevlar 49), las propiedades de las fibras de vidrio son isotropas, de forma que, por ejemplo, el módulo de Young a lo largo del eje de la fibra es el mismo que transversalmente a este eje. Esto es consecuencia directa de la estructura tridimensional de la red del vidrio.

El factor más importante que determina la resistencia a la rotura del vidrio es el daño que las fibras experimentan cuando rozan entre sí durante las operaciones del proceso. El deterioro mecánico se produce en forma de pequeñas grietas superficiales.

Fibras Orgánicas

El concepto de fibras orgánicas está basado teóricamente en la creación de fibras con una alta resistencia y alto módulo de elasticidad a partir de una perfecta alineación de polímeros. Podemos tomar como ejemplo las largas cadenas de polietileno que constan de cadenas unidas directamente en zigzag de carbono a carbono, completamente alineadas y agrupadas estrechamente, que tienen un módulo de elasticidad teórico de aproximadamente 220 GPa. Actualmente, se trata de fabricar fibras de polietileno de alta densidad y elevado módulo de elasticidad donde se busca

la máxima linealidad y alargamiento entre las cadenas de los polímeros durante el proceso de fabricación, durante el hilado y estirado.

Las fibras orgánicas más comunes en el mercado son las fibras de **aramida**, el cual es el nombre genérico de las fibras de poliamida aromática, con un diámetro aproximado de 12 μm . Las fibras de aramida fueron introducidas comercialmente en 1972 por Du Pont bajo el nombre comercial de Kevlar y en la actualidad hay dos tipos comerciales: **Kevlar 29** y **Kevlar 49**. El Kevlar 29 tiene una densidad baja y alta resistencia a tracción aportada por las fibras de aramida, y está diseñado para aplicaciones como protección balística, cuerdas y cables. El Kevlar 49 está caracterizado por una baja densidad, alta resistencia y alto módulo de elasticidad. Las propiedades del Kevlar 49 hacen a estas fibras útiles para el reforzado de plásticos en materiales compuestos para aplicaciones aeroespaciales, en marina, automoción y otras aplicaciones industriales.

La unidad química que se repite en la cadena del polímero Kevlar es la de la poliamida aromática que se muestra en la figura 2.7. La estructura de estas fibras es anisótropa y en conjunto, tienen alta resistencia y módulo de elasticidad en la dirección de la fibra. Las fibras de aramida responden elásticamente bajo tracción pero exhiben un comportamiento no lineal y dúctil bajo compresión; por otro lado, también ofrecen buena resistencia, tolerancia con los daños y fatiga.

Por cuestiones prácticas, a las fibras orgánicas Kevlar 49 serán mencionadas con el nombre de fibras de aramida.

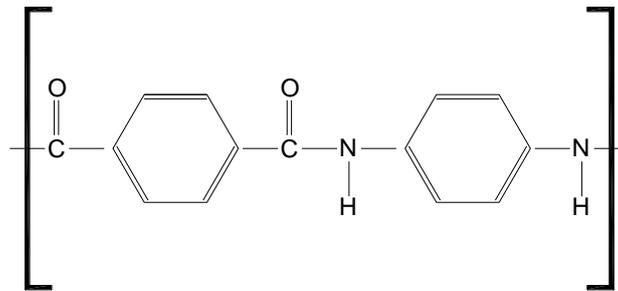


Figura 2.7 Unidad estructural repetitiva de las fibras de Aramida

2.2.1.3 - Comparación de las fibras

Las características principales de los tipos de fibra nombrados se muestran en la Tabla 2.8. Cabe destacar que los valores de la tabla corresponden a datos tomados sobre fibras con carga estática y sin exposición al exterior. Los valores para el diseño con FRP deben contemplar la presencia conjunta también de la resina y reducciones debidas a cargas a largo plazo, agentes ambientales,...

Material	Módulo de Elasticidad, GPa	Resistencia a Tracción, MPa	Elongación en Rotura, %
Fibra de Carbono			
- Alta Resistencia	215 – 235	3500 – 4800	1.4 – 2.0
- Muy Alta Resistencia	215 – 235	3500 – 6000	1.5 – 2.3
- Alto Módulo	350 – 500	2500 – 3100	0.5 – 0.9
- Muy Alto Módulo	500 – 700	2100 – 2400	0.2 – 0.4
Fibra de Vidrio			
- Vidrio E	70	1900 – 3000	3.0 – 4.5
- Vidrio S	85 – 90	3500 - 4800	4.5 – 5.5
Fibra de Aramida			
- Bajo Módulo, Kevlar 29	70 - 80	3500 – 4100	4.3 – 5.0
- Alto Módulo, Kevlar 49	115 – 130	3500 – 4000	2.5 – 3.5

Figura 2.8 Propiedades características de las fibras

Propiedades específicas

Indudablemente, el factor más importante que ha conducido al rápido desarrollo de los materiales compuestos es la reducción de peso que puede conseguirse a partir del uso de fibras de baja densidad con alto módulo elástico y resistencia. Las fibras de carbono son muy superiores a las fibras de vidrio en términos del módulo elástico específico. El módulo elástico de las fibras de aramida es significativamente mejor que el de las fibras de vidrio, pero inferiores al módulo elástico de las fibras de carbono.

Las fibras de aramida tienen una resistencia a tracción específica ligeramente superior que las fibras de vidrio y a algunos tipos de fibras de carbono. Esta última comparación no está plenamente justificada porque las fibras tienen que incorporarse a una resina para hacer un componente estructural. La fracción de volumen máxima de fibras normalmente alcanzada en el compuesto de la fibra orientada es aproximadamente 0'7 por lo que los valores deben reducirse por este factor.

Estabilidad térmica

En ausencia de aire y de otras atmósferas oxidantes, las fibras de carbono poseen unas propiedades excepcionalmente buenas a altas temperaturas. La resistencia y el módulo elástico dependen de la temperatura final del tratamiento térmico, como ya hemos comentado. Las fibras de carbono mantienen sus propiedades a temperaturas por debajo de los 2000°C. Para aplicaciones que incluyan

matrices de polímeros esta propiedad no puede ser aprovechada porque la mayoría de las matrices pierden sus propiedades aproximadamente por encima de los 200°C.

El vidrio en bruto tiene una temperatura de ablandamiento de aproximadamente 850°C pero la resistencia y el módulo de elasticidad de las fibras de vidrio disminuyen rápidamente por encima de los 250°C. Aunque la estabilidad térmica de la aramida es inferior a la de ambas fibras (vidrio y carbono), es adecuada probablemente para su uso en la mayoría de los sistemas con matriz de polímeros.

Además de la conservación de propiedades durante el uso en servicio a altas temperaturas es esencial que no se produzca deterioro de las propiedades durante las operaciones de fabricación. Los cambios en las propiedades del vidrio parecen ser casi reversibles con la temperatura pero la aramida puede sufrir un deterioro irreversible debido a cambios en la estructura interna.

Las fibras de aramida experimentan una grave fotodegradación bajo la exposición a la luz solar. Ambas luces, la visible y la ultravioleta causan efectos negativos, conduciendo a la decoloración y la reducción de las propiedades mecánicas. La degradación puede ser evitada cubriendo la superficie del material compuesto con una capa que absorba la luz.

Resistencia a compresión

Las propiedades de resistencia y la rigidez a compresión axial son valores difíciles de medir y sólo pueden reflejarse a partir de las propiedades de los materiales compuestos fabricados con dichas fibras. Se ha encontrado que la rigidez axial en compresión es aproximadamente la misma que en tracción para todas las fibras. Sin embargo, los datos de la tabla 2.9 indican que la resistencia a compresión longitudinal de láminas unidireccionales orientadas (todas las fibras orientadas en la misma dirección), fabricadas por Kevlar es sólo un 20% de su resistencia a tracción. En contraste, los correspondientes datos para las fibras de carbono y vidrio muestran que tienen resistencias similares a tracción y compresión.

Se muestran datos en la tabla de ejemplos de materiales compuestos:

Material	Tracción Paralela, MPa	Compresión Paralela, MPa	Tracción Perpendicular, MPa	Compresión Perpendicular, MPa	Cortante, MPa
Poliéster – Fibra de Vidrio	650 – 750	600 – 900	20 – 25	90 – 120	45 – 69
Epoxi – Fibra de Carbono	850 -1100	700 – 900	35 – 40	130 - 190	60 – 75
Epoxi – Fibra de Aramida	1100 - 1250	240 – 290	20 - 30	110 – 140	40 – 60

Tabla 2.9 Valores típicos de las propiedades de resistencia de las láminas unidireccionales

La baja resistencia a compresión del Kevlar 49 es debida a las propiedades anisótropas de la fibra y a la baja rigidez a cortadura. Básicamente, como en otras fibras textiles, el material tiene sólo una limitada elasticidad en compresión. A tracción, las cargas son soportadas por los enlaces covalentes, pero a compresión los débiles enlaces de hidrógeno hacen que se produzca esta relajación local y el deshilachamiento. Posteriormente, explicaremos más profundamente el término de láminas unidireccionales.

Flexibilidad y rotura de las fibras

Las curvas “tensión – deformación”, mostradas en la figura 2.10 sugiere que todas las fibras rompen de manera frágil a tracción sin ninguna deformación plástica o fluencia. Las láminas de fibra de carbono y vidrio son frágiles y se rompen sin ninguna reducción de su sección transversal, en contraste con las láminas de fibras de aramida, las cuales rompen de manera dúctil, con un pronunciado estrechamiento local muy grande. La fractura de las láminas a menudo implica el deshilachado de las fibras.

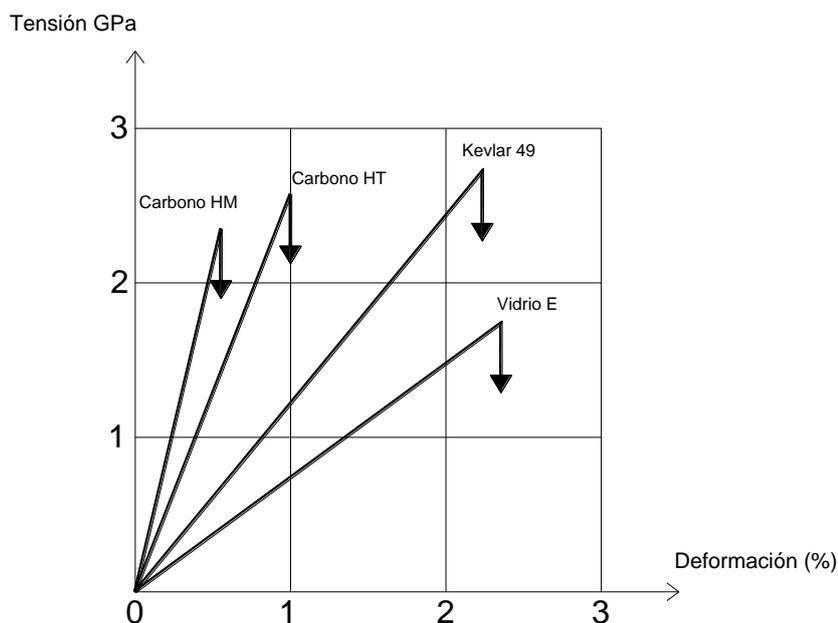


Figura 2.10 Curvas Tensión-Deformación de las fibras. Las flechas verticales indican rotura completa

Hemos desarrollado en este apartado el conocimiento general de los materiales compuestos y sus componentes principales con vistas a su aplicación en la ingeniería y construcción como elementos de refuerzo de estructuras de hormigón armado. Existen muchos más datos en relación a ellos y gran variedad de factores intervinientes en el sistema de refuerzo que analizaremos más profundamente a continuación y en el que destacaremos a los **materiales compuestos de fibra de carbono y resina epoxi** como aquellos que presentan las mejores propiedades y unas prestaciones excelentes para el refuerzo mediante adhesión externa de estructuras de hormigón armado.

2.3 - DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO

Los sistemas de refuerzo a base de “composites” consisten, en esencia, en el pegado externo sobre la superficie de hormigón, de unos materiales con unas prestaciones mecánicas, principalmente la resistencia a tracción, sobresalientes. De esta forma, los materiales compuestos actúan como una armadura externa, que hace unas funciones muy similares a las que hace la armadura interna de acero. Ya hemos comentado los materiales más utilizados en este tipo de refuerzos:

CFRP: Material polimérico reforzado con fibra de carbono (Carbon fiber reinforced polymer).

GFRP: Material polimérico reforzado con fibra de vidrio (Glass fiber reinforced polymer).

AFRP: Material polimérico reforzado con fibra de aramida (Aramid fiber reinforced polymer).

Los materiales constituyentes utilizados en los sistemas de reparación FRP disponibles comercialmente, incluyendo todas las resinas, imprimación base, masillas, saturantes, adhesivos, y fibras, han sido desarrollados para el refuerzo de estructuras de hormigón armado en base a los test realizados en materiales y estructuras.

Los materiales FRP consisten en un gran número de pequeñas, continuas, direccionadas y plásticas fibras con avanzadas características, atadas en una matriz de resina. En función del tipo de fibra, hablamos de CFRP, GFRP y AFRP. Normalmente, la fracción en volumen de fibras en los FRP se encuentra entre el 50-70% para las cintas laminadas y alrededor de 25-35% para los tejidos. De ahí que las fibras son el principal constituyente en lo que a tensión se refiere, mientras que la resina matriz transfiere esta tensión entre las fibras y las protege. Los materiales compuestos FRP para el refuerzo de estructuras mediante su adhesión externa al soporte de hormigón armado son fabricados y están disponibles en diferentes formatos.

Las propiedades mecánicas básicas de los materiales compuestos FRP deben ser estimadas en base a las propiedades de los materiales constituyentes (fibra y matriz) y su fracción en el volumen del compuesto, que debe ser logrado con la aplicación de la “regla de mezclas” como sigue:

$$E_f = E_{fib} V_{fib} + E_m V_m$$

$$f_f = f_{fib} V_{fib} + f_m V_m$$

donde:

E_f : Módulo de elasticidad del FRP en la dirección de las fibras.

E_{fib} : Módulo de elasticidad de las fibras.

E_m : Módulo de elasticidad de la matriz.

V_{fib} : Fracción de volumen de las fibras.

V_m : Fracción de volumen de la matriz.

f_f : Resistencia a tracción del FRP en la dirección de las fibras.

f_{fib} : Resistencia a tracción de las fibras.

f_m : Resistencia a tracción de la matriz.

Hay que anotar en las ecuaciones anteriores que: $V_{fib} + V_m = 1$. También, los valores típicos de volumen de fibras en laminados están en el orden de 0,50 – 0,70.

Existen en el mercado diferentes sistemas de presentación de refuerzos mediante adhesión externa de FRP, relacionado con los materiales constituyentes, la forma y tipo de refuerzo de FRP. En general, estos pueden ser divididos dos sistemas, en primer lugar el de prefabricados (precurados) y en segundo lugar, el sistema de preparados y posteriormente curados in situ. A continuación, daremos una visión general de las diferentes formas de estos sistemas.

2.3.1 - Materiales prefabricados

El material compuesto viene en forma de laminados, cintas o bandas longitudinales curadas preconformados, en los que las ya van las fibras como elemento resistente y una matriz de resina. Normalmente tienen un espesor de entre 1,2 y 1,4 mm y una anchura variable entre 50 y 200 mm. Se presentan en rollos de longitud entre 25 y 500 m que luego se cortan en obra a las dimensiones deseadas. En función de la sección de refuerzo que se requiera, los laminados también pueden colocarse en varias capas, adheridos entre ellos, hasta lograr la resistencia deseada.

Como adhesivo para adherir los laminados al soporte se utiliza una resina epoxi. Normalmente debe ser un adhesivo de dos componentes (resina epoxi y un endurecedor) de consistencia pastosa y alta tixotropía, para poderlo colocar en elementos horizontales y verticales sin problemas de descuelgue o despegue del soporte.

Las características que debe tener el adhesivo que se utilice para este fin son:

- Buenas resistencias, principalmente a tracción y cizallamiento
- Temperatura de transición vítrea elevada.
- Buena adherencia al hormigón y a los laminados

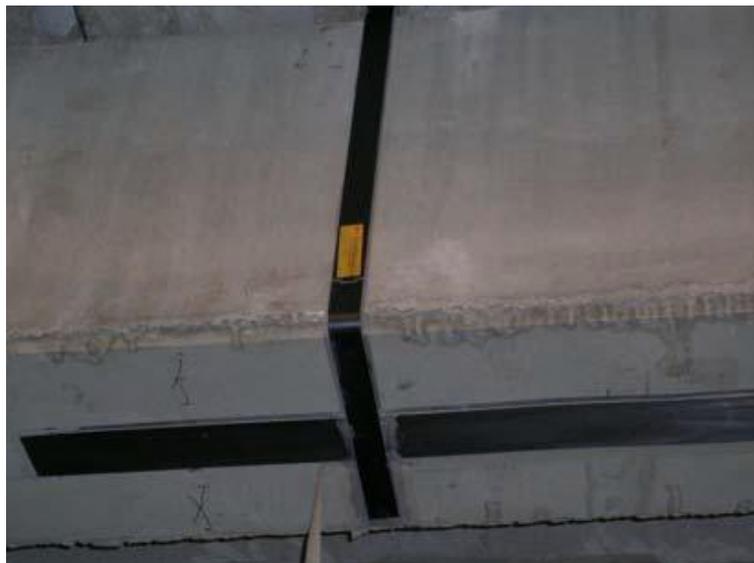
Observemos imágenes de los laminados de fibras:



Figuras 2.11 Presentación de los laminados de fibra de carbono

Existe un tipo de sistema dentro de este apartado de cintas prefabricadas que se compone de un producto laminado, igual al descrito en el primer sistema, pero que ya viene doblado en forma de "L" para adaptarse a ángulos rectos. Esta forma es adecuada para hacer refuerzos a esfuerzo cortante, a modo de estribos externos. Estos laminados se presentan en piezas de longitudes adecuadas para adaptarse a las dimensiones más habituales de las vigas (entre 30 cm y 100 cm para cada uno de los brazos).

La resina epoxi que se utiliza para este sistema es la misma que la descrita en el sistema de laminados rectos.





Figuras 2.12 Presentación de los laminados en L de fibra de carbono

2.3.2 - Materiales de tejidos de fibras

Los tejidos a base de fibra son materiales en los que no se ha colocado todavía la matriz de resina. Suelen tener entre el 95 y el 98% de las fibras en dirección longitudinal y entre el 2% y el 5% restante en la dirección transversal, para efectuar el cosido e impedir el deshilachado de los longitudinales.

De la misma forma que en los laminados, el tejido de fibra de carbono puede colocarse en varias capas, hasta conseguir el valor de resistencia deseado en el cálculo.

Los tejidos suelen tener un espesor de entre 0,13 y 0,30 mm, con gramaje de entre 200 y 800 g/m³. Se suelen presentar con anchos de entre 30 y 60 cm, en rollos de entre 40 y 100 m, que posteriormente se cortan en obra a las dimensiones deseadas.

Para adherir los tejidos al soporte de hormigón se suelen utilizar resinas epoxi fluidas. Esa fluidez permite a la resina penetrar entre las fibras del tejido, impregnarlas, mojarlas y formar el material compuesto.

Los tejidos pueden presentarse del tipo unidireccionales o pluridireccionales que pueden ser impregnados a pie de obra con el “sistema en húmedo”, o en el lugar de colocación mediante el “sistema en seco”.





Figuras 2.13 Presentación de los tejidos de fibra de carbono

2.3.3 - Resinas epoxi

Parte fundamental de estos sistemas de refuerzo lo constituyen las resinas que garantizan la adhesión de estos refuerzos al soporte. Estas resinas de base epoxi cumplen principalmente las siguientes misiones:

- **Resinas para imprimación de soportes**

Resinas de base epoxi y baja viscosidad diseñadas para cerrar los poros superficiales del hormigón. Una vez preparada la superficie del hormigón se procede a aplicar el imprimador que penetrando en el hormigón mejora las características resistentes superficiales de éste a la vez que incrementa la adhesión con la hoja de fibra de carbono.

El tapaporos de imprimación se presenta en forma de dos componentes (componente activo y endurecedor) envasados separadamente que deben mezclarse en el momento de su aplicación.

La mezcla de los mismos debe hacerse en la proporción indicada y en la cantidad necesaria para la aplicación que se vaya a realizar, teniendo en cuenta el tiempo de vida en el recipiente (pot-life) y el tiempo abierto de aplicación de la mezcla una vez realizada.

Existen diferentes versiones de imprimador en función de la temperatura ambiente, según esté comprendida entre 15° y 35°C (resinas de verano) ó entre 5° y 15°C (resinas de invierno).

- **Masillas de nivelación**

Estas masillas están especialmente diseñadas para relleno de cavidades, coqueas e irregularidades superficiales menores de 0,5 cm. Posee una elevada adhesión al hormigón, buena resistencia a compresión y un tiempo de vida en recipiente (pot-life) y tiempo abierto de utilización adecuados para la aplicación que se va a realizar con ella.

Existen diferentes versiones de masillas en función de la temperatura ambiente, según esté comprendida entre 15° y 35°C (verano) ó entre 5° y 15°C (invierno).

- **Adhesivo o resina**

Este es el material que va a actuar de puente de transmisión de cargas entre el hormigón y las láminas de fibras de carbono, por consiguiente sus características mecánicas y reológicas son de suma importancia para la mayor eficacia del refuerzo. La misión de la capa de adhesivo o resina es pegar la lámina de refuerzo a la superficie del hormigón y, al mismo tiempo, crear un compuesto de elevadas características mecánicas capaz de transmitir los esfuerzos desde el hormigón a la lámina de fibra de carbono, por consiguiente tiene que poseer una adhesión al hormigón y a la lámina muy buena, además de características mecánicas y reológicas adecuadas.

También existen diferentes versiones de resinas en función de la temperatura ambiente, resinas de verano y resinas de invierno.





Figuras 2.14 Homogeneización de resina bicomponente y aplicación en soporte

El parámetro principal que define las características de un refuerzo de FRP no es el de la resistencia a la tracción, que resulta siempre enormemente mayor que el de las tasas de trabajo a las que están sujetos los FRP, sino el módulo elástico. Cuanto más elevado es el módulo de las fibras, más alta es la contribución a la rigidez que estas podrán ofrecer.

Las fibras más adecuadas para ser utilizadas en la restauración de estructuras de hormigón armado son las **fibras de carbono** de resistencia media (carga de rotura a tracción > 2000 MPa) y módulo elástico medio-alto ($E=165-250$ GPa), un módulo de elasticidad más alto que las fibras de vidrio y aramida y compatible con la deformación del hormigón armado. Para la restauración de los edificios de albañilería y de las estructuras de madera, caracterizadas por un módulo elástico más bajo es, en cambio, más oportuno recurrir al uso de compuestos fibrosos caracterizados por un valor del módulo de elasticidad más bajo que el del carbono. En este caso, es mejor recurrir al uso de compuestos a base de fibras de vidrio, caracterizadas por un módulo elástico inferior a los 80 GPa y, por lo tanto, más compatibles desde el punto de vista elasto-mecánico con los soportes.

En lo relativo a la matriz polimérica, las **resinas epoxídicas** son preferibles a las de poliéster y vinilester, sobre todo por su mayor capacidad de adhesión al soporte cementoso y por ser la resina más compatible con las fibras de carbono. Es la que mejor moja las fibras y la que más adherencia tiene a ellas. Además tiene un curado sin retracción, lo cual es muy importante para el uso al que va destinado, siendo un problema en las resinas de poliéster y vinilester.

Posteriormente analizaremos los diferentes procesos de ejecución del refuerzo con materiales compuestos FRP en función del tipo de refuerzo a aplicar para cada caso concreto. No obstante, cabe destacar que los refuerzos de estructuras mediante la aplicación de estos materiales compuestos adheridos al soporte a reforzar son

válidos y están preparados para todo tipo de elementos, hormigón, acero, madera y mampostería, y que además, dado que se presentan comercialmente en diferentes formatos y con posibilidad de ser moldeables, también se pueden aplicar sobre cualquier tipo de soporte base, hablamos de pilares, vigas, forjados, muros, depósitos, tuberías... Encontramos de esta forma unos materiales de gran ligereza que no solo presentan unas excelentes propiedades mecánicas como elementos estructurales, sino que incluso permiten su adaptación a cada caso concreto de estudio en el campo de la ingeniería y la construcción.

2.3.4 - Fabricación del producto. La pultrusión

En la fabricación de los tejidos, los filamentos de fibra de carbono se ensamblan formando hebras sin torcer, usadas para crear una lámina unidireccional. Después de alineadas y estiradas, las fibras son introducidas en una prensa, en simultáneo con una tela de fibras de vidrio impregnada en epoxi y con un plástico de protección. Estas fibras de vidrio tan sólo aportan rigidez transversal al conjunto para evitar el deshilachado durante fabricación y transporte. La misma operación se realiza pero colocando en dos direcciones perpendiculares las fibras de carbono para la fabricación de los tejidos bidireccionales.

El proceso de fabricación de los laminados compuestos de fibra de carbono y resina epoxi es la pultrusión. La pultrusión es un proceso de fabricación competitivo en coste debido a su alta automatización y a la gran variedad de formas que se pueden obtener; es un proceso para la producción en continuo de perfiles con secciones constantes.

El proceso comienza cuando se tira de las fibras de refuerzo, en forma de roving, tejido,... que están colocadas a modo de bobinas en estanterías, al comienzo de la línea. El refuerzo se impregna de resina líquida al pasar a través de un baño o a través de una zona donde la resina se proyecta con inyectoras. Las bandas de refuerzo impregnadas pasan a través de una zona de conformado donde son preformadas con la forma de la sección del molde. Una vez preformadas entran en el molde, que tiene la forma precisa de la sección que se pretende obtener, donde a través de un proceso térmico y de presión se hace polimerizar la resina termoestable a través de una reacción altamente exotérmica, obteniéndose la forma final de la pieza. Una vez que el perfil sale del molde se le deja enfriar a temperatura ambiente, mediante una corriente forzada de aire o mediante una corriente de agua, mientras un mecanismo simultáneamente engancha y tira del perfil. El perfil sale del mecanismo de tirado y es cortado automáticamente a la longitud requerida.

La consideración que debe plantearse una vez seleccionada la fibra, es la posibilidad de orientar las fibras en la dirección óptima para aprovechar sus propiedades de forma ventajosa. Todos los materiales usados para el proceso de la pultrusión deben proveerse de una forma continua para asegurar largos periodos de trabajo en continuo sin defectos ni necesidad de empalmes.

- Roving: Es la forma más habitual utilizada en el proceso de pultrusión, se presentan los hilos de las fibras sobre bobinas.
- Mat de hilos continuos: Este refuerzo tiene fibras orientadas aleatoriamente en su plano. Se usa habitualmente en pultrusión para aumentar las propiedades mecánicas transversales del material que constituye las piezas y para generar superficies exteriores ricas en resina.
- Tejido biaxial: Cuando se pretende obtener un material con contenidos de volumen en fibra análogos en dirección transversal y longitudinal se debe recurrir a refuerzos en forma de tejido biaxial.
- Laminados biaxiales: Son laminados de fibras orientadas unidos mediante un cosido a lo largo del espesor.
- Matriz: La formulación adecuada para las mismas es esencial pues, además de mantener unido el refuerzo y transferir las tensiones entre fibras, hay una serie de propiedades del material compuesto que dependen única y exclusivamente de la resina, como son el comportamiento a altas temperaturas, la resistencia a la corrosión y las propiedades dieléctricas. Las resinas epoxi se utilizan cuando se requieren altas propiedades físicas y mecánicas.

Dentro del utillaje para pultrusión se pueden distinguir:

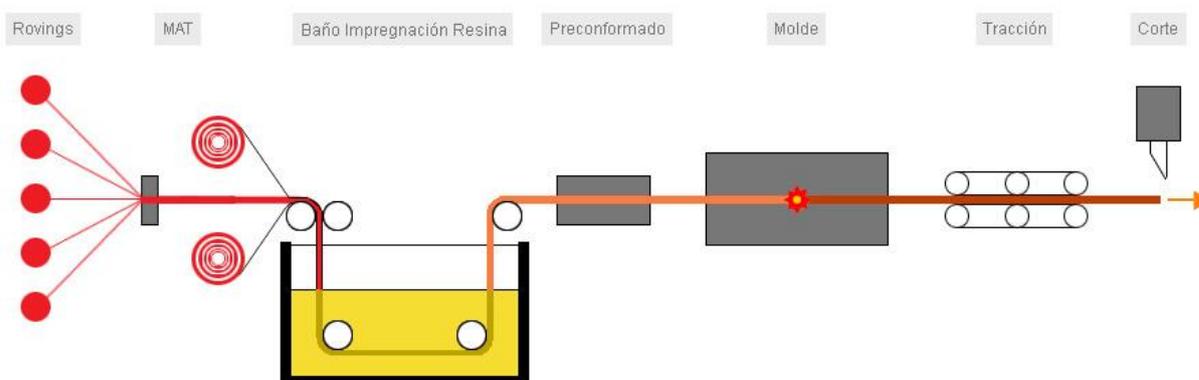
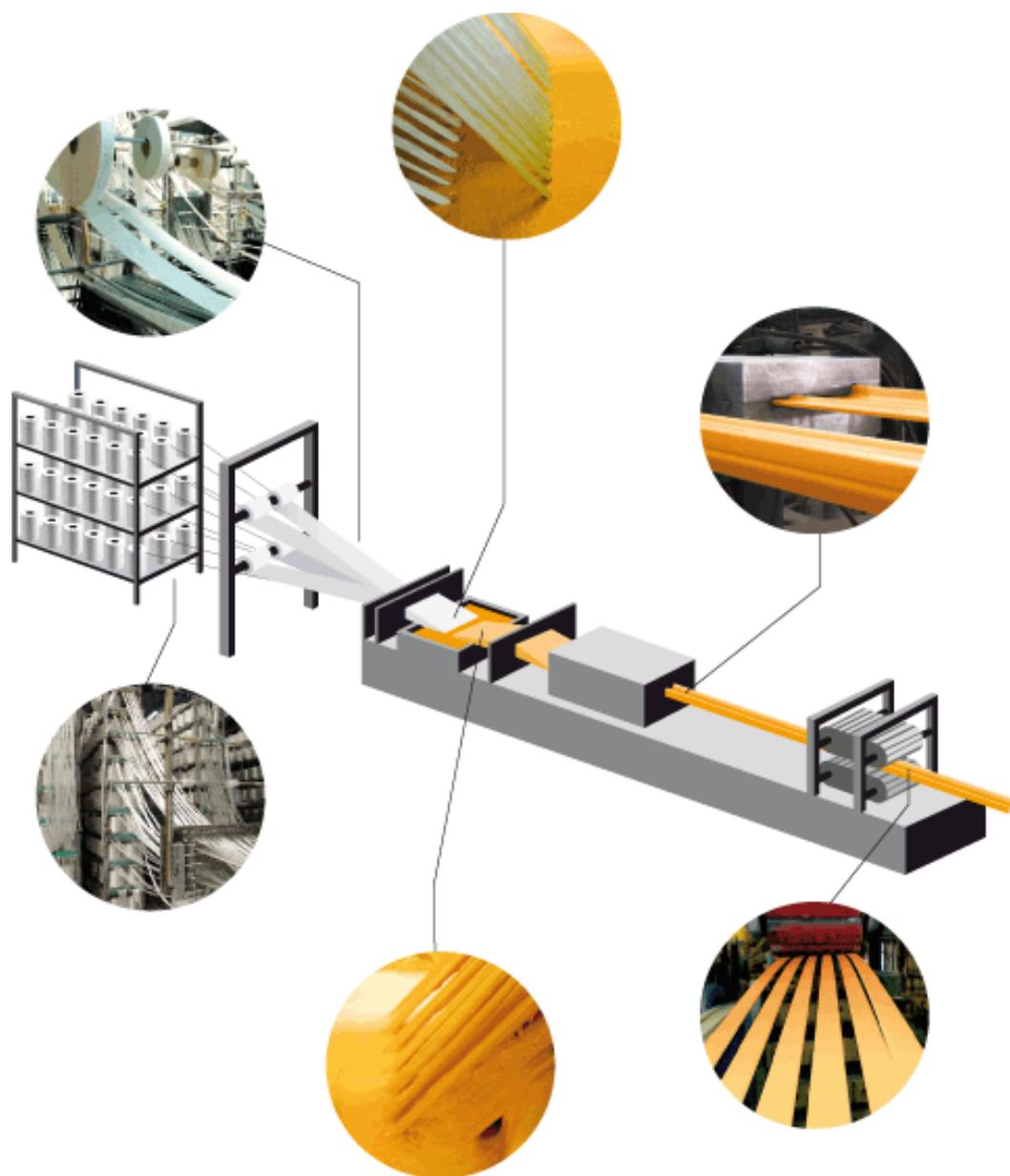
- Dispensador de refuerzo: Este consta de nasas o estanterías de hilo, dispensadores de fieltro y el velo. En algunos casos se pueden usar también bobinadoras o trenzadoras si la trama de refuerzo axial es necesaria.
- Impregnador de resina: Esto puede consistir en un baño de resina simple o de un dispositivo de impregnación a presión o vacío. El impregnador de resina satura, humedece, el refuerzo con una solución que contiene la resina, cargas, pigmentos y catalizadores, además de otros aditivos que fueran necesarios. El interior de impregnador de resina es cuidadosamente diseñado para optimizar el "wet-out" (saturación completa) de los refuerzos.
- Dado de preformado o preformador: Estos sirven de guía para que el refuerzo impregnado adopte la posición correcta, quite el exceso de resina, ofrecer precompactación aproximado del perfil con el fin de ayudar a la eliminación del aire, humedad y para reducir la presión en la matriz principal. Los materiales

comúnmente utilizados para la formación de guías son: teflón, polietileno de ultra alto peso molecular, acero cromado y diversas aleaciones de acero.

- Dado de pultrusión: Este es una matriz de acero mecanizado o de cerámica que se calienta y produce el perfil final. El dado puede ser de más 1 m de longitud. El dado es calentado generalmente por un sistema de resistencias eléctricas. Al pasar el material a través de la matriz, la transferencia de calor, inicia la reacción de curado y la velocidad de tracción dependerá de que la resina se haya curado completamente en el momento en que deja el dado.

- Dispositivo de tiro: Al haber un espacio adecuado entre la salida de la tobera y el dispositivo de tracción, el producto se enfría y la resina es lo suficientemente dura para ser atrapado por el dispositivo de tracción. Esto puede ser un mecanismo de rodillos, un transporte tipo oruga o un sistema de rodillos recíprocos. Las velocidades de tiro dependerán, además del tiempo y temperatura de curado, del tipo de resina y el tamaño y la forma del producto. Los valores típicos de la industria están en el rango 0.5m/min y 1.5m/min. Una separación física de 3 metros o más entre la salida de la tobera y el dispositivo de tracción es necesaria, con el fin de permitir que el producto caliente pultruido se enfríe en la atmósfera, en una corriente de agua forzada o enfriamiento por aire. Esto permite al producto desarrollar la fuerza suficiente para resistir las fuerzas de sujeción, para sujetar el producto y tirar de él a través del dado. Debido al tiro, los filamentos de fibra se encuentran en tensión cuando el curado ocurre en el molde calentado. Como consecuencia de esta tensión, las fibras tienen valores más altos de la fuerza y se ajustan más, lo que permite una buena compactación, con más fibras dispuestas en un determinado volumen.

- Dispositivo de corte: Se trata de un corte con sierra que está programado para cortar el producto a la longitud deseada. La sierra está fabricada de un material duro y resistente (generalmente carburo de diamante). La sierra está sujeta al producto de pultrusión durante la operación de aserrado o con un avance paralelo al pultruido (igual velocidad).



Figuras 2.15 Esquema del proceso de pultrusión

En cada mercado de aplicación de los materiales pultruidos, éstos siempre deben competir con los materiales tradicionales como madera, aluminio, PVC (cloruro de polivinilo), hormigón y acero.

Las principales ventajas de los perfiles obtenidos por pultrusión frente a los materiales tradicionales son las siguientes:

- Calidad constante y estabilidad dimensional: fácil de reparar, bajas tolerancias.
- Bajo peso: estos materiales son hasta un 80% más ligeros que el acero y un 30% más ligeros que el aluminio, por esto son una alternativa importante cuando reducir peso es un requerimiento.
- Gran resistencia y rigidez: para un mismo peso, un composite pultruido es más resistente y rígido que el acero, simplemente variando el tipo y orientación de los refuerzos.
- Buen acabado superficial.
- Elevada resistencia química y a la corrosión: muchos perfiles poseen un velo superficial sintético que les proporciona una capa rica en resina mejorando incluso su ya elevada resistencia química y a la corrosión.
- Aislante térmico y eléctrico: no son eléctricamente conductores y tienen una conductividad térmica 250 veces más baja que el aluminio y 60 veces más baja que el acero.
- Nulo mantenimiento: debido a sus excelentes propiedades (corrosión) estos materiales requieren un nulo o muy pequeño mantenimiento.
- Fácil diseño e instalación: debido a su ligereza.
- Transparencia magnética y a radiofrecuencias: adecuados para aplicaciones medias, antenas, etc.
- Propiedades de retardante a la llama.
- Elevada resistencia al arrastre y a la fatiga.

Sin embargo, la pultrusión también tiene ciertos inconvenientes. A continuación se recogen los más importantes:

- Alta dificultad para fabricar piezas que no sean unidimensionales y de sección constante.
- Necesidad de un molde de altas prestaciones con acabado muy fino (para no impedir el avance de la pieza en el proceso), de un sistema de calentamiento y, en ocasiones, de presurización interior. Todo ello hace que el costo del molde sea muy elevado y que se necesiten series muy largas de producción para amortizarlo.
- La velocidad del proceso es relativamente baja comparada con la velocidad de la extrusión.

- Problemas de adhesión cuando es necesario unir piezas mediante adhesivos, debido al acabado tan fino de las piezas. Para obtener uniones de altas prestaciones es necesario preparar las superficies de unión mediante un proceso previo mecánico (lijado de la superficie), químico (baño con sustancias que catalizan la reacción de adhesión) o añadir un peel-ply (devanador) en la entrada del molde.
- En perfiles de pultrusión altamente unidireccionales no es posible realizar uniones mecánicas con altos requerimientos estructurales.



Figuras 2.16 Imágenes de la pultrusión y producto resultante

2.3.5 - Campos de aplicación de los refuerzos FRP

La necesidad de reforzar una estructura puede ser debido a varios motivos, como vemos a continuación:

- Incrementos de cargas
 - Incremento de la capacidad resistente en pilares, forjados y vigas.
 - Aumento de la capacidad de puentes para soportar un aumento de cargas axiales.
 - Instalación de maquinaria pesada.

- Defectos del proyecto o de la ejecución
 - Dimensiones insuficientes de los elementos estructurales.
 - Armadura insuficiente o mal colocada.
 - Mala disposición de los elementos estructurales.
 - Materiales de baja calidad.

- Renovación de estructuras antiguas
 - Conocimientos de insuficiencias del método de cálculo empleado.
 - Consideración de refuerzos frente a sollicitaciones dinámicas.
 - Envejecimiento de los materiales con pérdida de sus características iniciales.
 - Adecuación del proyecto inicial a nuevas normas más exigentes.

- Cambios en la propia forma de la estructura
 - Apertura de huecos en forjados.
 - Eliminación de pilares o muros de carga.

- Daños en la estructura
 - Impactos sobre la estructura.
 - Incendios.
 - Corrosión y pérdida de sección de las armaduras del hormigón.
 - Sismo.

- Necesidad de mejora en las condiciones en servicio
 - Reducción en la tensión de las armaduras.
 - Disminución en las deformaciones y flechas, utilizando laminados de alto módulo.
 - Disminución de la abertura de las fisuras
 - Reducción de la fatiga.

Podemos observar que son múltiples los campos de aplicación de los adhesivos composites en edificación e ingeniería. Ya hemos comentado las excelentes propiedades de los polímeros reforzados con fibra de carbono y los formatos disponibles comercialmente. Este hecho permite la aplicación de los productos en función de las necesidades de refuerzo de la estructura, en concreto:

- Refuerzo a flexión
- Refuerzo por confinamiento
- Refuerzo a cortante
- Refuerzo de muros

Debe considerarse también como dato destacable de los refuerzos mediante polímeros reforzados con fibra de carbono CFRP que además de su ligereza, hecho que facilita claramente su puesta en obra, y de sus propiedades mecánicas ya justificadas, hablamos también de un sistema de refuerzo que envuelve el elemento estructural, sin incrementar prácticamente su volumen ni reducir los espacios para permitir la actividad a desarrollar. Por otro lado, una vez colocado, se le puede aplicar al refuerzo una capa de pintura que puede ocultarlo aún más en el global de la estructura y puede pasar desapercibido completamente. Existen a su vez resinas y protectores de acabado aplicables sobre el refuerzo para mejorar sus propiedades y durabilidad, según el caso, protectores contra incendios, contra la luz solar,...

Veamos a continuación cada tipo de refuerzo más detalladamente y contrastaremos también la información señalada en este último párrafo.

2.3.5.1 - Refuerzo a flexión

Para el refuerzo a flexión de vigas, viguetas, forjados y otros elementos de hormigón armado se utiliza, principalmente, el método de pegado de laminados rectos de fibra de carbono sobre la cara traccionada. En algún caso también se puede utilizar el método de pegado de los tejidos. En ambos casos consiste en adherir el refuerzo que actuará como armadura externa de tracción, principalmente. El adhesivo servirá para transmitir el esfuerzo cortante entre el refuerzo y el hormigón.

Cabe destacar que la impresión general es que los refuerzos FRP no se deben utilizar como refuerzo a compresión. El módulo de elasticidad a compresión de los sistemas FRP es, en general, inferior que a tracción. Por otro lado, las configuraciones típicas de sistemas de refuerzo externo tienen una rigidez muy baja a la flexión, de modo que se puede producir un pandeo local con relativamente bajos niveles de tensión. Sin embargo, en ciertos casos el FRP puede ser sometido a tensiones de

compresión que pueden ser de una importancia secundaria pero no despreciable. Valga como la ejemplo la aplicación de refuerzos FRP adheridos sobre los pilares y en casos de vigas y forjados, refuerzos de negativos en la cara superior del elemento que se extienden hasta regiones de momentos positivos.



Figuras 2.17 Imágenes de refuerzo a Flexión mediante Laminados CFRP

Se puede observar en las imágenes los trabajos de refuerzo a flexión, en el primer caso de vigas y en el segundo, de un forjado. En primer lugar, los laminados de fibra de carbono se colocan sobre la cara inferior de la viga, en el tramo central del vano. En este caso, el refuerzo se realiza sobre el armado de positivos de la viga.

En segundo lugar, se observa el refuerzo por la cara superior del forjado en su apoyo sobre el pilar. Se trata de un refuerzo del armado de negativos.

En ambos casos, se aprecia claramente la ejecución del refuerzo mediante el pegado externo sobre la estructura existente de laminados de fibra de carbono.

2.3.5.2 - Refuerzo a cortante

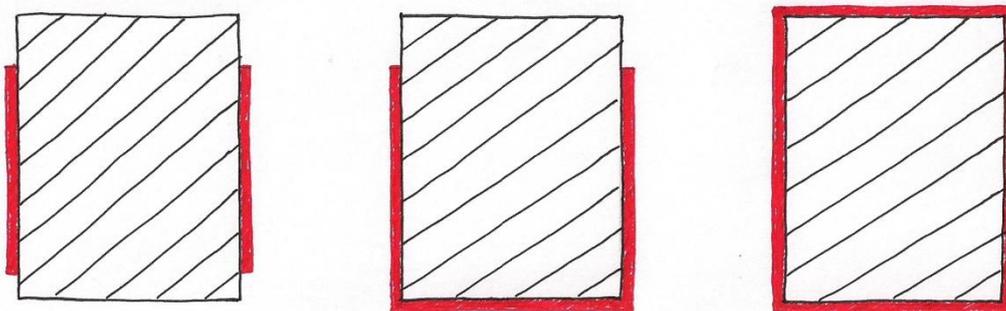
Para el refuerzo de piezas a cortante lo que se hace es colocar las fibras de carbono a modo de estribos externos, adheridos por la resina epoxi. Para realizar este tipo de refuerzo se pueden utilizar tanto el sistema de tejidos como el de laminados preconformados en forma de "L". En ambos casos, se trata de envolver o cercar transversalmente el elemento a reforzar.





Figuras 2.18 Imágenes de refuerzo a Cortante mediante Laminado y Tejido de CFRP

Tenemos en las imágenes dos ejemplos de refuerzo a cortante de vigas. En el primer caso, mediante la adhesión externa de perfiles laminados de fibra de carbono comercializados en forma de L (en este caso también se ha realizado refuerzo a flexión de la viga con los laminados rectos pegados en la cara inferior). En el segundo caso, se trata de un refuerzo a cortante con el pegado de tejido de fibra cubriendo la superficie completa de la viga.



Figuras 2.19 Configuraciones geométricas de la superficie adherida de refuerzo a cortante: a ambos lados de la sección, en forma de U o recubriendo totalmente la sección transversal.

2.3.5.3 - Refuerzo por confinamiento

Para elementos sometidos a compresión simple o compuesta se puede hacer un refuerzo por confinamiento. Este tipo de refuerzo se hace principalmente en pilares. El sistema a utilizar es el de tejidos, debido a su fácil adaptabilidad a cualquier forma del soporte.

Con los tejidos se envuelve la pieza a reforzar completamente, de abajo a arriba. Se le pueden poner tantas capas de tejido como se desee. Esta envoltura provoca un confinamiento de la pieza que hace mejorar su comportamiento frente a cargas. Cuando la pieza se comprime, se acorta, y por efecto Poisson se dilata transversalmente. El efecto de confinamiento es controlar esta dilatación transversal, mejorando así la capacidad portante.





Figuras 2.20 Imágenes de refuerzo por Confinamiento mediante Tejido de CFRP

En ambos casos se trata de envolver exteriormente con el tejido los elementos verticales que trabajan a compresión, mejorando la capacidad portante del elemento mediante el control de la dilatación transversal. El proceso de ejecución del confinamiento puede realizarse por vía húmeda o vía seca, como veremos posteriormente.

2.3.5.4 - Refuerzo de muros

Otro tipo de refuerzo, quizá menos usual, es el de muros, tanto de fábrica de ladrillo como de hormigón. Estos muros pueden estar sometidos a esfuerzos longitudinales (cargas sísmicas, de viento...) como verticales (cargas gravitatorias). Con el sistema de pegado de tejidos mediante la adhesión del tejido sobre la superficie, se logra mejorar la capacidad portante de los muros contra cualquiera de las cargas indicadas anteriormente.





Figuras 2.21 Imágenes de refuerzo en muros

Hemos observado las diferentes aplicaciones de los refuerzos mediante sistema FRP adheridos externamente a los elementos de hormigón armado, en función de los esfuerzos a los que están sometidos. En este trabajo nos centraremos en el refuerzo a flexión de vigas y el análisis del procedimiento de diseño y cálculo que aparecen en las guías de diseño ACI 440 y Bulletin 14, FIB.

CAPÍTULO 3

ENSAYOS EN MATERIALES COMPUESTOS

3.1 - INTRODUCCIÓN

El cálculo y diseño de estructuras con materiales compuestos requiere disponer de datos experimentales fiables. En los casos de cálculo y análisis, la caracterización experimental se puede hacer a varias escalas: micromecánica, macromecánica o estructural. El ensayo de los materiales compuestos tiene tres objetivos principales:

- Determinación de las propiedades básicas de la lámina unidireccional para su uso como datos de entrada en el cálculo y diseño estructural
- Investigación y verificación de modelos mecánicos de comportamiento
- Estudios experimentales del comportamiento del material y de estructuras con geometrías específicas y bajo condiciones de carga determinadas.

Bajo estos tres objetivos generales, podemos nombrar tipos específicos de ensayos y aplicaciones concretas de dichos ensayos:

1- Caracterización de los materiales constituyentes: fibras, matrices e interfase entre ambas, para su uso en un análisis micromecánico. Conociendo de antemano estas propiedades uno puede predecir, en principio, el comportamiento de la lámina individual y, a continuación, el de los laminados y estructuras.

2- Caracterización de las propiedades de la lámina unidireccional simple que forma la unidad básica de construcción de laminados de material compuesto.

3- Determinación de las propiedades interlaminares, es decir, de la interacción entre láminas de material compuesto.

4- Comportamiento del material bajo condiciones especiales de carga, por ejemplo, fatiga multiaxial, deformaciones diferidas en el tiempo o impacto.

5- Análisis experimental del estado tensional y resistencia de estructuras y sistemas de materiales compuestos, especialmente aquellos que presentan discontinuidades geométricas, como bordes libres, agujeros, uniones, o transiciones súbitas.

6- Evaluación de la integridad estructural por medio de ensayos no destructivos.

En el caso de refuerzo y reparación de estructuras de hormigón armado, este esquema es igualmente válido. Los componentes a ensayar más habituales son la fibra de carbono y la resina epoxi que cumple la función tanto de matriz de la lámina de carbono como de adhesivo entre el laminado y el sustrato. La caracterización de láminas generalmente se limita a ensayar las propiedades elásticas en la dirección de la fibra de láminas unidireccionales, pero el conocer otras propiedades como el comportamiento ante los diferentes esfuerzos y tensiones amplía nuestra capacidad de diseño. Por último, el ensayo de la estructura completa permite determinar la influencia de los distintos sustratos.

Por la propia naturaleza de los materiales compuestos, los métodos de ensayo empleados para su caracterización son mucho más complejos que los empleados para materiales isotrópicos, y no todos ellos están normalizados.

3.2 - CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES

3.2.1 - Caracterización de las fibras

Las propiedades ensayadas más comunes son el módulo longitudinal, la resistencia a tracción y el alargamiento a rotura. La norma ASTM D3379-75 describe un ensayo apropiado para la caracterización de estos parámetros. Este método se recomienda para fibras con módulo elástico mayor de 21 Gpa. El ensayo se realiza sobre una fibra individual o filamento, que se monta a lo largo del eje central de un papel troquelado que permite tensar y alinear la fibra sin dañarla (Fig. 3.1). Una vez que la probeta se monta en la máquina de ensayo, el papel se rasga para permitir la elongación de la fibra. La Fig. 3.2 muestra una curva tensión-deformación típica del carbono.

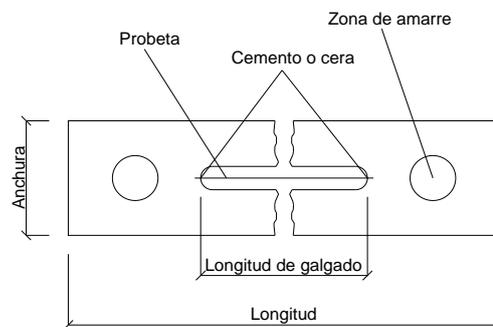


Figura 3.1 Método de ensayos de fibras

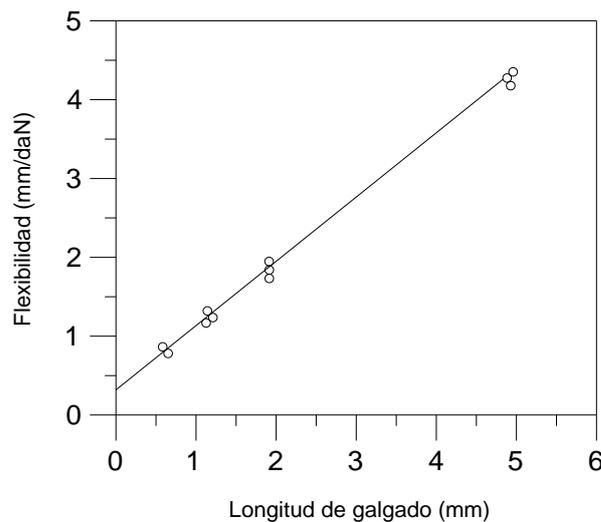


Figura 3.2 Curva tensión-deformación típica de la fibra de carbono

3.2.2 - Caracterización de matrices y adhesivos

La resistencia y módulo de tracción así como la deformación de rotura pueden determinarse usando paneles planos o probetas como la que se muestra en la Fig. 3.3. Los detalles de este método de ensayo se reflejan en la Norma ASTM D638M-844 para un panel grueso (1,0 a 10,0 mm) y ASTM D638-784 para un panel delgado (< 1,0 mm).

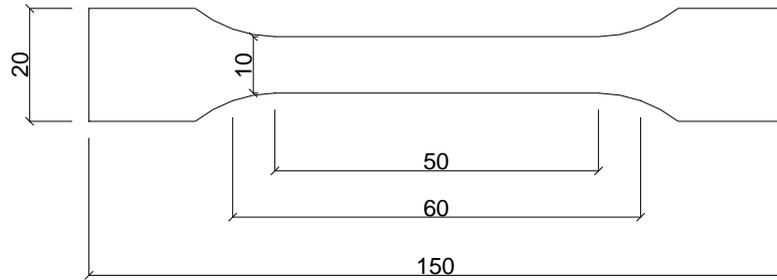


Figura 3.3 Probeta de tracción para ensayos mecánicos en resinas

Debido a la gran dependencia entre la velocidad de deformación y la velocidad de carga, los resultados de los ensayos deben ser interpretados cuidadosamente. La deformación puede medirse mediante bandas extensométricas o extensómetros. Si se quiere obtener el coeficiente de Poisson, la deformación transversal puede medirse mediante una banda extensométrica colocada perpendicularmente a la dirección de la carga.

3.3 - CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

3.3.1 - Determinación de la densidad y volumen de fibra

- Densidad

La densidad de un material compuesto puede determinarse obteniendo el peso de la probeta en seco y sumergida en agua. La probeta puede ser cualquier pieza de tamaño y forma generales siempre que su volumen no sea inferior a 1 cm³. El peso de la probeta sumergida en agua puede determinarse por medio de un hilo fino que rodee la probeta y se una a uno de los extremos de una balanza. El recipiente no debe tocar ni el hilo ni la probeta y cualquier burbuja adherida al hilo o a la probeta debe eliminarse frotando con otro hilo.

Los detalles de este método de ensayo se describen en la norma ASTM D3800-79.

La gravedad específica se determina a partir de la relación:

$$\rho = \frac{a}{a + w - b}$$

donde:

a: Peso de la probeta en seco

w: Peso del hilo parcialmente sumergido

b: Peso del conjunto probeta + hilo sumergidos

La densidad se obtiene multiplicando la gravedad específica por 0,9975.

- Porcentaje de volumen en fibra

Método de la disolución en ácido:

El contenido en fibra de los materiales compuestos de matriz orgánica se suele determinar disolviendo la resina del material compuesto en un medio que no ataque la fibra. Una vez que la resina está completamente disuelta, el residuo (la fibra) se filtra, limpia, seca y pesa. La elección del medio que disuelva la resina depende del tipo de matriz. Para las resinas epoxi, el medio más habitual es el ácido nítrico concentrado.

La Norma ASTM D3171-76 describe los detalles de este método de ensayo. El porcentaje en volumen de fibra se obtiene a:

$$\%V_f = \frac{w_f/\delta_f}{w_c/\delta_c} \times 100$$

donde:

w_f: Peso de la fibra en el material compuesto

w_c: Peso del material compuesto

δ_f : Densidad de la fibra

δ_c : Densidad del material compuesto.

Si se conoce la densidad de la matriz, **δ_m**, la fracción de volumen de vacíos **V_v** puede calcularse a partir de la relación:

$$V_V = 1 - \frac{[w_f/\delta_f + (w_c - w_f)/\delta_m]}{w_c/\delta_c}$$

Método directo:

El porcentaje en volumen de fibra puede determinarse a partir de las densidades de la fibra, la matriz y el material compuesto, suponiendo que el contenido de vacíos es despreciable. En muchos casos, los materiales compuestos de matriz orgánica se fabrican con un contenido de vacíos menor del 1%. En estos casos se acepta calcular el porcentaje de volumen de fibra mediante la expresión:

$$\%V_f = \frac{\delta_c - \delta_m}{\delta_f - \delta_m} \times 100$$

3.3.2 - Propiedades mecánicas a tracción

Las propiedades a tracción, como la resistencia a tracción, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson de materiales compuestos laminados planos, se determinan por ensayos estáticos a tracción en concordancia con ASTM 3039. La probeta a tracción es rectangular, laterales rectos, y de sección constante con pestañas unidas mediante adhesivo en sus extremos (Fig. 3.5). Se utiliza un material compatible para las lengüetas finales para reducir las concentraciones de tensión en el área sujeta y promover así el fallo a tracción en la sección de ensayo.

La muestra es sujeta a la máquina de ensayo por unas mordazas en cuña y estirada a una velocidad recomendada de 2 mm/min. Las deformaciones longitudinales y transversales se miden utilizando bandas extensiométricas eléctricas de resistencia que son adheridas en la galga de la muestra. Se determinan la resistencia a tracción longitudinal y el máximo coeficiente de Poisson en el ensayo a tracción de laminados unidireccionales, 0°. La resistencia a tracción transversal y el mínimo coeficiente de Poisson se determinan en el ensayo a laminados unidireccionales a 90°.

Como ya hemos comentado, para el caso de laminados con las fibras dispuestas en la dirección principal de los esfuerzos de tracción, la curva de tensión-deformación es lineal hasta el fallo. Estas muestras fallan por rotura a tracción de las fibras, que es seguida o acompañada por una abertura longitudinal paralela a las fibras (despegue a lo largo de la interfase fibra-matriz).

- Probeta de ensayo:

Se aceptan universalmente probetas rectangulares, de sección constante con lengüetas incorporadas en los extremos. La Tabla 3.4 representa las dimensiones recomendadas por la ASTM D 3039. La Fig. 3.5 muestra la geometría de la probeta:

Orientación de la fibra respecto a la carga	Anchura (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)
0 grados	12,7	127	1 a 2,54
90 grados	25,4	38	1 a 2,54
Multidireccional	25,4	127	1 a 2,54

Tabla 3.4 Dimensiones recomendadas de la probeta en mm

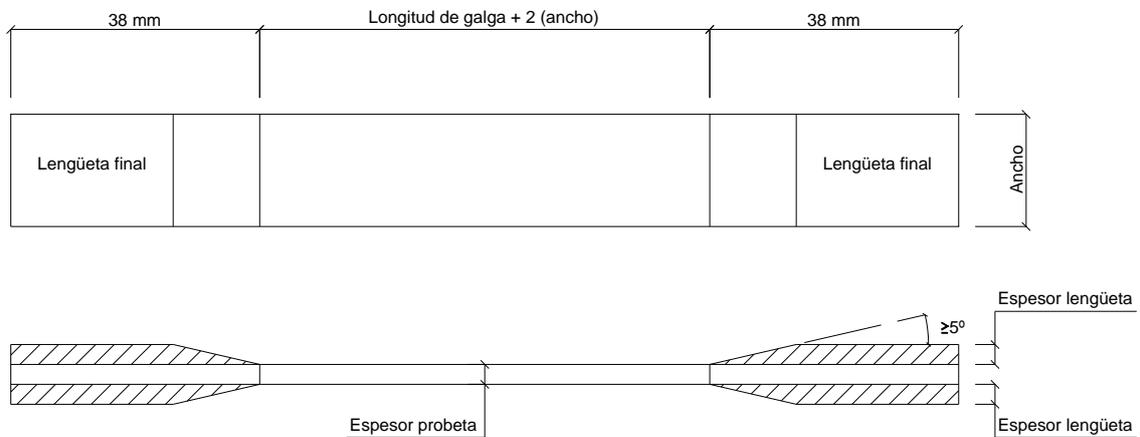


Figura 3.5 Configuración de la probeta de ensayo a tracción

- Lengüetas de amarre:

Se utilizan generalmente placas de tejido o laminado cruzado de vidrio E/epoxi y aluminio. Las probetas con fibras orientadas a 90 grados se ensayan frecuentemente sin lengüetas de amarre. La longitud de la lengüeta se determina en función de la resistencia a cortadura del adhesivo y la resistencia a tracción del material compuesto. Debe estar comprendida entre 25 y 38 mm.

El espesor de la lengüeta varía con el espesor de la probeta, y su rango de variación se encuentra entre 1,5 y 2,5 mm. Se recomienda utilizar cualquier adhesivo de alta deformación compatible con las condiciones ambientales. Finalmente, se recomienda preparar la superficie de unión mediante las operaciones de lijado y limpieza con un disolvente adecuado.

3.3.3 - Propiedades mecánicas a compresión

Las propiedades a compresión de los laminados son difíciles de medir debido al pandeo lateral de las probetas. Numerosos métodos de ensayo y diseños de probetas se han desarrollado para superar el problema del pandeo. Dos de estos métodos se muestran a continuación:

- Ensayo celanese:

Este fue el primer test standard desarrollado para ensayar los composites reforzados con fibras a compresión; sin embargo, debido a sus múltiples deficiencias no se considera un ensayo standard. Utiliza una probeta de laterales rectos con lengüetas adheridas en sus extremos y un agarre cónico tipo pinza de 10° que encaja en las mangas de un cono interior a juego. Una cubierta cilíndrica externa se utiliza para el montaje y la alineación.

Mientras se aplica la carga a compresión en los extremos de los manguitos cónicos, el agarre de la muestra se aprieta y la galga es comprimida por fuerzas de fricción transmitidas a través de los extremos de las lengüetas. Calibradores de tensión están montados en la galga para medir los datos de deformación longitudinal y transversal.

- Ensayo IITRI:

Este ensayo fue el primero del Instituto de Investigación Tecnológica de Illinois y más tarde fue adoptado como el ensayo a compresión standard de los materiales compuestos reforzados con fibras (ASTM 3410). Es similar al ensayo celanese excepto en la utilización de mordazas en cuña plana en lugar de cónicas. Superficies en cuña plana proporcionan un mejor contacto entre la cuña y la pinza que las superficies cónicas y mejoran la alineación. También permite la variación del espesor de las probetas. El accesorio del ensayo IITRI contiene dos espigas guías paralelas en su mitad inferior que se deslizan en dos casquillos de rodillos que se encuentran en su mitad superior. La ayuda de las guías mantiene una buena alineación lateral entre las dos mitades durante el ensayo.

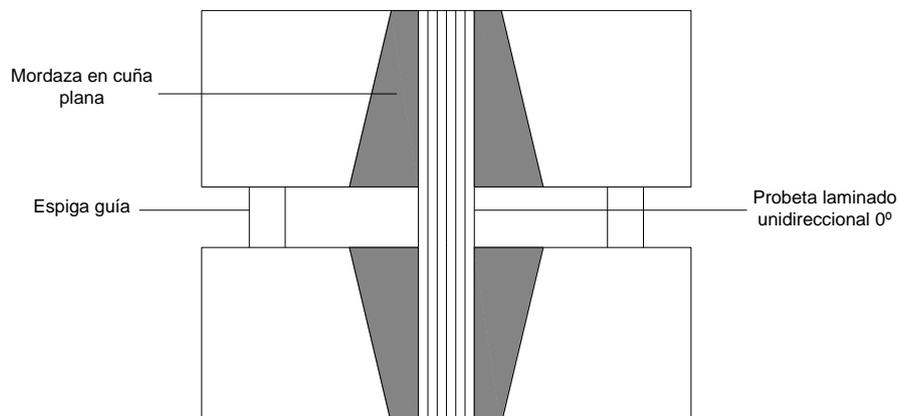


Figura 3.6 Ensayo IITRI y accesorios para test de compresión

Los datos de ensayos a compresión de FRP son limitados. Para los laminados con las fibras orientadas en la dirección del esfuerzo, podemos hacer las siguientes observaciones generales:

- 1- A diferencia de los metales dúctiles, la resistencia a tracción del laminado no es igual que la resistencia a compresión.
- 2- A diferencia de las curvas tensión-deformación a tracción, las curvas a compresión no son lineales.
- 3- La resistencia a compresión longitudinal en el laminado depende del tipo de fibra, fracción de fibras en el volumen, límite elástico de la matriz, ratio de longitud y diámetro de las fibras y su alineación.
- 4- Las fibras de carbono exhiben una resistencia a compresión y módulo de elasticidad ligeramente inferior que a esfuerzo de tracción. De igual forma sucede con las fibras de vidrio. No es el caso del Kevlar 49, donde la resistencia a compresión se reduce notablemente respecto de la tracción.

3.3.4 - Propiedades mecánicas a flexión

Las propiedades a flexión, como la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad, se determinan en base al método de ensayo ASTM D790. En este ensayo, una viga de sección rectangular de material compuesto (Fig. 3.7) es cargada en modo a flexión en tres puntos. Se recomienda un gran ratio entre la luz y el espesor (L/h). La máxima tensión de la fibra en el fallo de la cara traccionada de la probeta se considera la máxima resistencia a flexión del material.

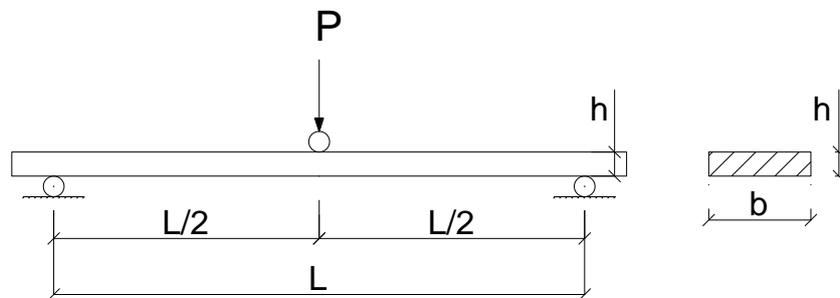


Figura 3.7 Disposición de ensayo a flexión de 3 puntos

Este ensayo ha recibido mucha aceptación en la industria de los materiales compuestos porque la preparación de la probeta y los accesorios necesarios son muy simples. No obstante, las siguientes consideraciones del ensayo deben ser reconocidas:

- 1- La tensión máxima de la fibra no siempre puede ocurrir en la capa más externa del laminado.
- 2- En el ensayo a flexión en tres puntos, tanto las tensiones normales como las cortantes están presentes a lo largo de la luz de la viga.

- 3- Debido a la gran deflexión en altos ratios L/h , se desarrollan esfuerzos importantes finales en los soportes. Esto a su vez afecta a las tensiones a flexión de la viga.
- 4- Aunque el valor de la resistencia a flexión está basado en la tensión máxima a tracción en la fibra externa, esto no refleja la resistencia a tracción real del material. Esta discrepancia crece debido a la diferencia en la distribución de tensiones bajo esfuerzos de flexión y de tracción. Las cargas flectoras crean una distribución no uniforme de tensiones a lo largo de la viga, sin embargo las cargas a tracción sí crean una distribución uniforme de tensiones.

Cabe destacar que la resistencia en el ensayo a flexión en tres puntos puede ser significativamente mayor que su resistencia a tracción.

3.3.5 - Propiedades mecánicas a cortadura plana

Se han utilizado variedad de métodos de ensayo para medir la resistencia a cortante plana, así como el módulo y la resistencia última a cortante de los laminados. Se representa el método de ensayo más común, ASTM D3518:

- Ensayo a cortante $\pm 45^\circ$:

Se trata del ensayo a tracción uniaxial de un laminado simétrico. Las dimensiones de la probeta, la preparación y el procedimiento de ensayo son los mismos que los descritos en el método de ensayo a tracción (ASTM 3039). La Fig 3.8 representa la probeta y el posicionamiento de dos galgas extensométricas.

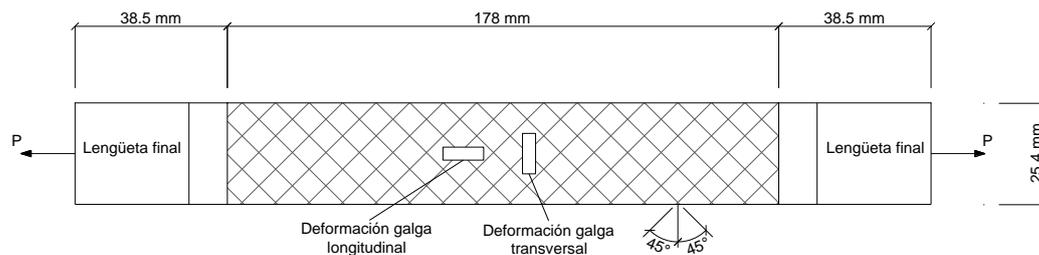


Figura 3.8 Configuración para ensayo a cortante $\pm 45^\circ$

Este método presenta también la ventaja de que la probeta es sencilla y barata de fabricar y no se requiere ningún utillaje especial. Cabe destacar que:

- La relación tensión-deformación a cortadura en un material compuesto no es lineal.
- A pesar de que los materiales con las todas fibras orientadas en la dirección del esfuerzo, 0° , son los que tienen mayor resistencia a tracción y módulo, sus propiedades a corte son peores.

3.3.6 - Resistencia interlaminar a corte

La resistencia a corte interlaminar se refiere a la resistencia a corte paralela al plano de laminación. Se mide el ensayo en viga de poca longitud de acuerdo con ASTM D2344. Una probeta a flexión de pequeña proporción entre longitud y profundidad (L/h) es ensayada a flexión en tres puntos para producir un fallo a cortante horizontal entre las láminas.

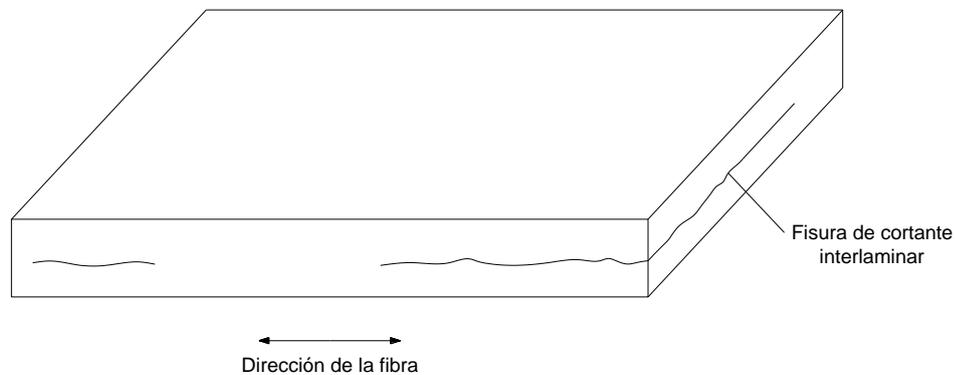


Figura 3.9 Fallo interlaminar de cortante en laminado 0° en ensayo de cortante en viga corta

Del método de ensayo se puede apreciar que la tensión normal máxima en la viga decrece con la disminución del ratio L/h y la tensión máxima a corte (en el eje neutro) no es afectada por el ratio L/h . De ahí que para ratios suficientemente pequeños L/h , la tensión máxima a cortante alcanzará la resistencia a cortante interlaminar a pesar de que la tensión normal máxima es todavía bastante baja. La viga fallará en el modo a corte interlaminar mediante fisuración a lo largo del plano horizontal entre láminas. Los ratios L/h recomendados para el ensayo oscila entre 4 y 5; no obstante será necesario ensayar muestras de varios ratios para determinar el fallo interlaminar a cortante.

3.4 - CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

No existen ensayos normalizados de los sistemas de refuerzo de estructuras de hormigón, fábrica de ladrillo o madera mediante laminados de carbono. Existen una serie de informes sobre estudios individuales, realizados por diversas instituciones. En este apartado se va a describir un estudio real realizado en la Universidad de Zaragoza.

3.4.1 - Sistemas de refuerzo

La Fig. 3.10 muestra de forma esquemática los dos sistemas de refuerzo a estudiar: el refuerzo a flexión se ejecuta mediante la superposición de una serie de capas, hasta alcanzar un espesor dado, y siempre orientando las fibras en la dirección de máxima tracción. Para ello se fijan en la cara inferior de la viga, tratando así de evitar la aparición de grietas en las zonas de momento flector máximo que posteriormente progresarán en dirección vertical.

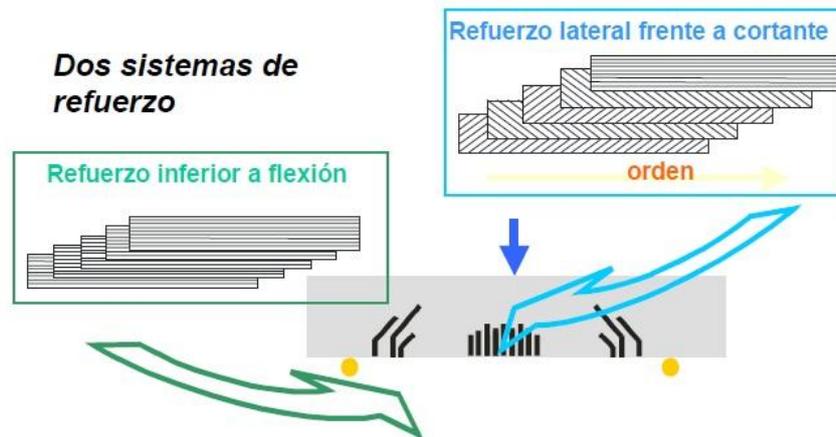


Figura 3.10 Esquema de refuerzos estudiados

El refuerzo frente a esfuerzos cortantes, trata de prevenir la formación de grietas, que si bien siguen originándose por tensiones principales máximas (mecanismo de fallo dominante en los materiales frágiles como el hormigón), poseen una distribución más errática. Su progresión puede ser visualizada con la ayuda de las líneas isostáticas (familia de curvas envolventes de las direcciones principales). En una viga sometida simultáneamente a tensiones normales producidas por flexión, y tensiones tangenciales como resultado de los esfuerzos cortantes presentes, la relación entre ambas varía a lo largo de la longitud y altura del elemento, haciendo variar así la dirección de las tensiones principales desde 0° (paralela a la directriz de la viga) en las fibras extremas superior e inferior hasta formar 45° en la línea neutra. Ésta es la razón de que en el refuerzo a cortante se empleen laminados a $\pm 45^\circ$.

3.4.2 - Preparación y geometría de las probetas

En la fabricación de las probetas, junto a las vigas de hormigón, se empleó un preimpregnado de fibra de carbono unidireccional y resina epoxi. Como adhesivo se empleó un compuesto comercial de uso específico. Se trata de un adhesivo bicomponente basado en epoxi.

Para la preparación de las placas de refuerzo, se hizo uso de la bolsa de vacío. La Fig. 3.11 muestra el esquema de fabricación y distintas etapas de la misma.



Figuras 3.11 Preparación de probetas

El estudio experimental realizado constó de dos fases: en primer lugar, y con el objeto de caracterizar el comportamiento del hormigón se ensayaron una serie de vigas compuestas únicamente de hormigón sin reforzar. En la segunda fase se procedió a ensayar las probetas fabricadas con refuerzo.

Los resultados obtenidos, reacción y desplazamiento en un ensayo de flexión por tres puntos, ilustran el comportamiento tanto resistente como de deformación para los diferentes sistemas de refuerzo estudiados. La elección del método de ensayo, flexión por tres puntos, responde a la facilidad de su realización y no tanto a la obtención de unos datos extrapolables a situaciones de carga o geometrías diferentes.

La Fig. 3.12 corresponde a la geometría de las probetas ensayadas.

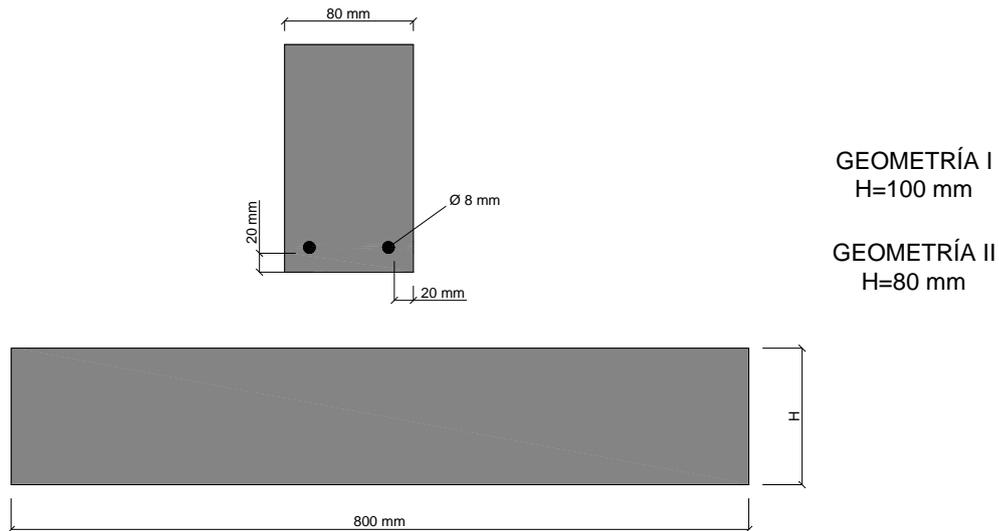


Figura 3.12 Geometría de las probetas ensayadas

3.4.3 - Resultados

Se emplearon en el curso del estudio experimental cuatro tipos diferentes de probetas, correspondientes a dos geometrías y sistemas de refuerzo diferentes. Las dimensiones de ambas geometrías se muestran en la Fig. 3.13.

Los dos sistemas de refuerzo estudiados, flexión y flexión-cortadura, se ensayaron para una geometría diferente, empleándose en ambos casos el ensayo de vigas sin reforzar como método de control, utilizados para comparar sus resultados con aquellas probetas reforzadas y así poder extraer conclusiones acerca de la efectividad de la técnica de refuerzo empleada.

- Vigas sin refuerzo:

La siguiente figura muestra el instante previo al fallo de ambas vigas sin refuerzo.



Geometría I

Geometría II

Figura 3.13 Ensayo sobre probetas sin refuerzo

El modo de fallo detectado en el caso de la geometría I sin refuerzo corresponde predominantemente a cortadura, con la aparición de una grieta ascendente a 45 grados que inicia su progresión desde uno de los apoyos hasta alcanzar la zona de aplicación de la carga. En el caso de la geometría II se aprecian claramente tres grietas de tracción junto a una grieta que atraviesa casi por completo la longitud de la viga dividiendo ésta en dos. Los elevados valores de deflexión alcanzados son atribuibles al excesivo tamaño de árido presente, que provoca una deficiente cohesión en el seno de la viga y una reducida adherencia a las barras de acero.

- **Con refuerzo a flexión:**

En cuanto a las vigas reforzadas, en el primer caso, el de refuerzo a flexión, el refuerzo empleado consiste de cinco capas de carbono unidireccional con un espesor total de 1.5 mm.

El sobredimensionado diseño a tracción resultante origina en esta situación un aumento de las tensiones tangenciales que provocan la aparición de características grietas por cortadura a 45 grados (Fig. 3.14). En todos los ensayos realizados, éstas aparecen en el extremo de la zona de refuerzo y ascienden hasta la zona de carga. Se puede apreciar así mismo la delaminación del adhesivo en la zona de apoyo.



Figura 3.14 Viga con refuerzo inferior a flexión (Geometría I)

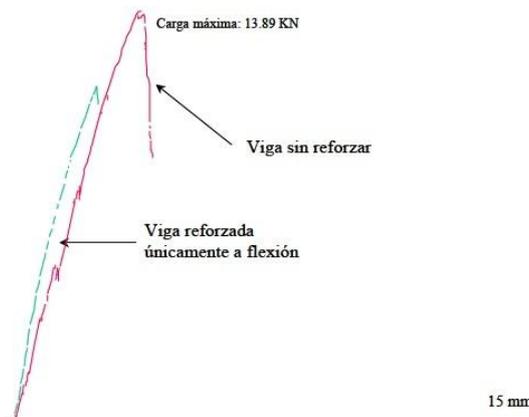


Figura 3.15 Fuerza frente a flecha en el ensayo de la viga con refuerzo a flexión

El comportamiento es prácticamente lineal hasta el instante de fallo, con una brusca caída de la resistencia en torno a 14.000 N. Una vez descargada, no se observó rastro de plasticidad ni corrosión en el acero de refuerzo. El comportamiento observado en este caso es similar al de la viga de referencia sin reforzar: comportamiento estable hasta el instante de fallo, en que la carga desciende bruscamente. La rigidez en este caso es algo superior a la del caso sin carbono, y sin embargo el valor máximo de carga alcanzado se encuentra por debajo de aquel. La causa se halla en el deficiente diseño a cortante que resulta al reforzar únicamente a flexión una viga que carece de estribos ni armaduras verticales.

De la inspección de las vigas ensayadas se extraen las siguientes conclusiones:

- Se ha mantenido a lo largo de todo el ensayo la integridad de la unión carbono-adhesivo-sustrato. El empleo de este tipo de adhesivo, para este caso en concreto, ha resultado por tanto satisfactorio.
- Se ha logrado cierto aumento de rigidez, si bien la resistencia resultante se halla por debajo incluso de la de referencia (viga sin reforzar). Este comportamiento resulta por tanto ineficiente, y las causas responsables de ello, ya detalladas, deberán solventarse mediante la ejecución de un refuerzo adecuado (a cortante).
- El fallo de la estructura no se ha visto afectado por ningún tipo de defectos, mal estado de las barras de acero o del carbono. A excepción del hormigón, ninguno del resto de los elementos resistentes ha agotado su capacidad de carga. Se trata por tanto de un diseño mal aprovechado.

- Refuerzo a flexión-cortadura:

El refuerzo empleado consiste de seis capas de carbono dispuestas en la parte inferior de la viga y tres capas en cada uno de los laterales con orientación a ± 45 grados. La Fig. 3.16 muestra la viga ensayada.



Figura 3.16 Viga con refuerzo inferior a flexión y lateral a cortadura (Geometría II)

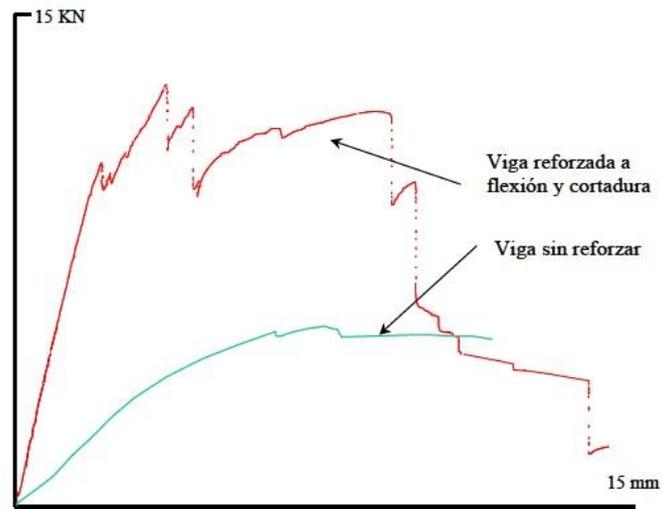


Figura 3.17 Fuerza frente a flecha en el ensayo de la viga con refuerzo a flexión-cortadura

En este caso, el empleo del refuerzo sí es efectivo. El efecto de confinamiento hace que se elimine el deslizamiento que se observaba en las barras de acero, que se observa claramente en el ensayo de la viga sin reforzar. En una primera etapa se observa una zona lineal, hasta que se produce el fallo completo del hormigón. En ese momento, los distintos sistemas de refuerzo pasan a actuar, produciéndose el fallo progresivo en la adherencia de los mismos, lo que se traduce en un mantenimiento de la carga. Por último, la carga cae bruscamente cuando las láminas de refuerzo dejan de actuar al producirse una discontinuidad en la transmisión de esfuerzo.

CAPÍTULO 4

CRITERIOS DE DISEÑO Y CÁLCULO

4.1 - APLICACIONES Y USO

Los sistemas de polímeros reforzados con fibra de carbono CFRP pueden aplicarse a la rehabilitación y restauración de un elemento estructural deteriorado, actualizar y reforzar estructuras para resistir un incremento de cargas o para reparar errores de diseño o de ejecución. El técnico debe determinar si una solución mediante sistema de CFRP es una técnica de refuerzo apropiada antes de seleccionar el tipo de refuerzo mediante polímeros reforzados con fibras de carbono. El refuerzo puede aplicarse mediante laminados adheridos en el elemento a reforzar o el tejido de fibras de carbono.

Para evaluar la aceptación de un sistema de CFRP para una aplicación particular, el técnico debe realizar una valoración de las condiciones de la estructura existente estableciendo su capacidad de carga, identificar las deficiencias y sus causas, y determinar las condiciones del sustrato de hormigón armado. La evaluación global debe incluir una rigurosa inspección de la zona, una revisión del diseño existente o documentos as-built y un análisis estructural. Los documentos de construcción existentes en el apartado de estructura deben ser revisados, incluyendo los planos de diseño, especificaciones de proyecto, información as-built, informes de campo, documentación de reparaciones anteriores y la documentación de mantenimiento. El técnico debe llevar a cabo una minuciosa investigación de la estructura existente. La resistencia a tracción de las superficies del hormigón armado donde el sistema de CFRP vaya a ser instalado debe ser evaluada mediante un test de adhesión-arrancado. Además, la investigación del lugar debe verificar lo siguiente:

- Dimensiones reales de los elementos estructurales.
- Localización, tamaño y causas de grietas y fisuras.
- Cantidad y localización de refuerzo de acero si existiese.
- Localización y alcance de la corrosión en el acero.
- Comprobación in situ de la resistencia a compresión del hormigón.
- Consistencia y solidez del hormigón armado, especialmente en la superficie del hormigón donde el sistema de refuerzo debe adherirse.

La capacidad de carga de la estructura existente debe basarse en la información recogida en la investigación del lugar, la revisión de los cálculos de diseño y planos, y determinada por métodos analíticos u otros. Pruebas de carga y otros procedimientos pueden incorporarse a la evaluación global si se considera oportuno. El técnico debe peritar la documentación disponible y consultar con las empresas que comercializan los FRP para asegurarse que el sistema elegido y el revestimiento de protección son los correctos para la finalidad que se pretende.

Vamos a aplicar en este apartado los criterios de diseño y cálculo de refuerzos de fibra de carbono en vigas de hormigón armado para esfuerzos de flexión que aparecen en dos de las guías de diseño existentes de mayor aplicación a nivel mundial en relación a este tipo de refuerzo. Es importante destacar que se trata de guías de diseño y no de normativas, por lo que su procedimiento de diseño se presenta como recomendaciones. Actualmente no existe una norma en relación al refuerzo de estructuras de hormigón armado mediante la aplicación de polímeros reforzados con fibra de carbono.

Estas guías son:

- Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, American Concrete Institute ACI-Committee 440.
- Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, Fédération Internationale du Béton FIB.

4.2 - FILOSOFÍA DEL DISEÑO

Revisemos en este apartado las bases para el cálculo de los refuerzos y recomendaciones generales de diseño que aparecen en cada una de las dos guías de diseño indicadas. Posteriormente analizaremos la metodología de cada una de ellas y las posibles desviaciones o diferencias.

4.2.1 - ACI 440

Los sistemas de refuerzo mediante FRP deben ser diseñados para resistir las tensiones manteniendo la compatibilidad de deformaciones entre el FRP y el sustrato de hormigón. Al refuerzo no puede confiársele la resistencia a fuerzas de compresión y por tanto no debe ser considerada en el cálculo.

Las recomendaciones de diseño se basan en los principios de cálculo de los estados límite. Este enfoque establece niveles aceptables de seguridad contra la incidencia de los Estados Límites de Servicio (excesiva deformación, agrietamiento) y los Estados Límites Últimos (fallo, tensión de rotura, fatiga). En la evaluación de la resistencia nominal de un elemento, los posibles modos de fallo y posteriores esfuerzos y tensiones en cada material deben ser calculados. Para evaluar la capacidad de servicio de cada elemento pueden utilizarse los principios de la ingeniería.

Los coeficientes de seguridad de las acciones y los materiales deben tomarse de los que aparecen la guía **ACI 318, Código de requerimientos para el hormigón estructural en edificación**. En este cálculo de ACI 440 se establecen coeficientes de reducción adicionales en la contribución del refuerzo FRP que reflejan el menor conocimiento de estos sistemas de refuerzo. El técnico debe procurar la incorporación de más factores reductores de resistencia, si existe incertidumbre respecto a la capacidad de servicio de los materiales existentes.

4.2.1.1 - Límites de resistencia

Algunos técnicos y empresas que comercializan el producto recomiendan que el elemento estructural sin aplicar refuerzos FRP, debe tener la suficiente resistencia para soportar un cierto nivel de carga. Con este pensamiento, en el caso de que el sistema FRP sea dañado, la estructura todavía estará capacitada para resistir un razonable nivel de cargas sin producir colapso. La recomendación del Comité ACI es

que la resistencia de la estructura existente sea la suficiente para soportar el nivel de cargas descrito en la ecuación:

$$(\phi R_n)_{existente} \geq (1.2S_{DL} + 0.85S_{LL})_{nueva}$$

donde:

ϕ : Coeficiente reductor de fuerza

R_n : Resistencia nominal de un elemento

S_{DL} : Valor de las cargas permanentes

S_{LL} : Valor de las cargas variables

4.2.1.2 - Resistencia al fuego de la estructura

Las resinas poliméricas utilizadas tanto en los refuerzos laminados como en los tejidos pierden su integridad estructural con temperaturas que superan la temperatura de transición vítrea del polímero T_g . Esta temperatura es variable y oscila entre los 60 y 82 °C. Debido a las altas temperaturas que se alcanzan durante un incendio y la baja temperatura que resisten los sistemas de FRP, éstos no serán capaces de perdurar durante un considerable espacio de tiempo un incendio. Además, con frecuencia no es viable el aislamiento del sistema FRP para incrementar su resistencia al fuego porque la cantidad de aislamiento que sería necesario para proteger el sistema resultaría extremadamente elevada.

Aunque el sistema de refuerzo de FRP por si mismo tiene baja resistencia al fuego, la combinación del sistema FRP con una estructura existente de hormigón armado debe tener un nivel aceptable de resistencia al fuego. Esto puede ser atribuible a la inherente resistencia al fuego de únicamente la estructura de hormigón existente. Es importante admitir que la resistencia de los refuerzos tradicionales de hormigón armado, principalmente el acero, se reduce también durante la exposición a las altas temperaturas debidas a un incendio. La resistencia de un elemento estructural existente con un rango de resistencia al fuego debe satisfacer las condiciones de la ecuación si va a ser reforzado con un sistema CFRP:

$$(R_{n\phi})_{existente} \geq S_{DL} + S_{LL}$$

donde:

$R_{n\phi}$: Resistencia nominal de la estructura original a temperaturas elevadas

S_{DL} : Valor de las cargas permanentes

S_{LL} : Valor de las cargas variables

Los resultados de las cargas, S_{DL} y S_{LL} , deben ser determinadas utilizando los requerimientos de carga vigentes para la estructura. Si el sistema CFRP está destinado a permitir mayores esfuerzos de carga, como un incremento de cargas

activas, los resultados de las cargas deben ser calculados utilizando estas cargas mayores.

La resistencia nominal de un elemento ante elevadas temperaturas $R_{n\phi}$ debe ser calculada para el periodo de tiempo requerido por el rango de resistencia al fuego y debe desestimar la contribución del sistema FRP. El coeficiente de resistencia nominal de un miembro se determina en las directrices descritas en **ACI 216R, Guía para determinar la resistencia al fuego de elementos de hormigón.**

La resistencia al fuego de los elementos estructurales reforzados con FRP mejoran con el uso de ciertas resinas, protecciones u otros métodos de protección al fuego, pero todavía no ha sido suficientemente demostrado que aisle al sistema FRP de las temperaturas que se consiguen durante un incendio.

4.2.1.3 - Selección de sistema de refuerzo

Las condiciones del entorno únicamente afectan a la resina y fibras de varios sistemas de refuerzo. El proyectista debe seleccionar el sistema de refuerzo basado en el conocimiento del sistema en las condiciones de servicio previstas: alcalinidad/acidez, expansión térmica, conductividad eléctrica, consideraciones de carga y durabilidad, selección de protecciones.

Se propone la tabla 4.1 que ilustra el coeficiente reductor aplicable a las fibras de carbono en función de su exposición a diferentes entornos, de forma que cuanto más agresivo es el entorno, mayor es el coeficiente reductor. La fibra de carbono es la que presenta mejores propiedades, con un coeficiente cercano a la unidad, lo que nos indica que su fiabilidad es realmente buena.

Condiciones de exposición	Tipo de fibra y resina	Coficiente reductor C_E
Exposición interior	Carbono/Epoxi	0'95
	Vidrio/Epoxi	0'75
	Aramida/Epoxi	0'85
Exposición exterior (puentes, muelles y garajes abiertos)	Carbono/Epoxi	0'85
	Vidrio/Epoxi	0'65
	Aramida/Epoxi	0'75
Entorno agresivo (plantas químicas y plantas de tratamiento de aguas residuales)	Carbono/Epoxi	0'85
	Vidrio/Epoxi	0'50
	Aramida/Epoxi	0'70

Tabla 4.1 Coeficiente reductor del entorno de sistema FRP

Pueden aplicarse protecciones en el sistema de refuerzo para protegerlo de la exposición ciertas condiciones del entorno, como veremos posteriormente.

4.2.1.4 - Propiedades de los materiales en el diseño

Normalmente, las propiedades del material suministradas por las empresas, como la resistencia a tracción última, no consideran la exposición a largo plazo a las condiciones del entorno y deben ser consideradas como las propiedades iniciales. Debido a que la exposición a largo plazo y a varios tipos de entorno pueden reducir las propiedades mecánicas y la resistencia a fatiga y fluencia de los laminados compuestos, las propiedades mecánicas aplicadas en las ecuaciones de diseño deben incluir el coeficiente reductor en función del entorno. Las ecuaciones proporcionan las propiedades mecánicas que deben ser utilizadas en todas las ecuaciones de cálculo. La resistencia última debe determinarse aplicando el coeficiente reductor de la tabla 3.1 para la fibra y la condición de exposición:

$$f_{fu} = C_E f_u^*$$

De igual forma, el factor deformación también debe reducirse en función de las condiciones del entorno:

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

Como todos los materiales compuestos son elásticos linealmente hasta el fallo, el cálculo del módulo de elasticidad puede determinarse por la ley de Hooke. La expresión para el módulo de elasticidad reconoce que el módulo, normalmente, no es afectado por las condiciones del entorno. En este caso, el módulo tomado para esta ecuación tendrá el mismo valor que el inicial aportado por la empresa:

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}}$$

4.2.2 - Bulletin 14 FIB

El refuerzo de estructuras mediante sistemas adheridos externamente es una técnica eficiente que confía en la acción conjunta del elemento de hormigón y el refuerzo exterior. Es muy importante la elección del sistema más apropiado, el diseño correcto y su ejecución, así como el estado y reparación del elemento existente antes de la aplicación del refuerzo.

Existen diversos métodos y combinaciones de refuerzo disponibles que exigen que el proyectista tenga la suficiente experiencia en el cálculo de reparaciones estructurales y debe tener conocimiento sobre los materiales y sistemas, la respuesta esperada de la estructura y aspectos de seguridad.

4.2.2.1 - Requerimientos del diseño

El procedimiento de diseño debe consistir en la verificación de ambos estado límite de servicio (ELS) y estado límite último (ELU). Las siguientes situaciones de diseño deben considerarse:

- Situación continua, correspondiente con el uso normal de la estructura.

- Situación accidental, correspondiente con la imprevista pérdida del refuerzo (debido a impactos, vandalismo, fuego,...).
- Consideraciones especiales de diseño, tensiones en el adhesivo debido a diferencias en el coeficiente de expansión térmica, resistencia al fuego, al impacto,...

4.2.2.2 - Verificación del estado límite de servicio (ELS)

Debe ser demostrado que el elemento reforzado o la estructura trabajan correctamente en condiciones normales. Para este requerimiento, la verificación ELS normalmente concierne:

- Tensiones; han de ser limitadas a fin de prever la fluencia del acero, daños o excesivo desprendimiento del hormigón y excesivo deslizamiento o rotura del refuerzo CFRP.
- Deformaciones o retracciones; quienes pueden restringir el uso normal de la estructura, provocan daños en elementos no vinculados con las cargas o influyen negativamente en la estética.
- Aplastamiento (incluso aplastamiento en la interfase del adhesivo); puede dañar la durabilidad, funcionalidad y aspecto de la estructura o pueden poner en peligro la integridad de la interfase del adhesivo entre el hormigón y el refuerzo FRP.

Si las razones para el refuerzo están relacionadas con la mejora de la capacidad de servicio, los ELS se tomarán como la prioridad en el diseño, por encima de ELU. Incluso si la razón para el refuerzo es dictada por consideraciones del incremento de la resistencia, debe presentarse como prioridad en el diseño el ELS para elementos sometidos a flexión. Es más, como los materiales FRP tienen elevada resistencia, se necesitarán secciones más pequeñas de FRP para ELU, que pueden ser insuficientes para alcanzar los criterios de servicio.

Para las verificaciones ELS, se considera una respuesta tensión-deformación lineal para los materiales constituyentes y los factores parciales de seguridad de los materiales γ_M se toman igual a 1.0. Para las combinaciones de carga se aplica el **Eurocódigo 2**. En el caso del FRP, se tomará de la siguiente relación:

$$\sigma_f = E_{fk} \varepsilon_f$$

donde E_{fk} es el valor característico del módulo de elasticidad. Este último se determina entre el 10% y 50% de la resistencia última del FRP.

4.2.2.3 - Verificación del estado límite último (ELU)

En ELU deben considerarse los diferentes modos de fallo que pueden suceder. En general, los modos de fallo pueden ser subdivididos entre aquellos que suponen el comportamiento correcto entre el hormigón y el sistema FRP (acción compuesta total) y aquellos que comprueban los diferentes mecanismos de despegue del FRP que pueden ocurrir (fallo del adhesivo).

Los coeficientes de seguridad de las acciones y los materiales que se toman en el cálculo corresponden a los aplicados en el **Eurocódigo 2**. El diseño de situación accidental es una verificación en el que se supone la pérdida del refuerzo debido a impacto, vandalismo o incendio. El miembro sin reforzar se somete a todas las combinaciones de carga accidentales del miembro reforzado. Esta verificación se realiza en estado límite último, considerando el factor parcial de seguridad para los materiales igual a 1'0 y considerando los coeficientes reductores de seguridad y combinación de cargas como aparecen en el Eurocódigo 1, parte 1.

Las condiciones ambientales deben ser tenidas en cuenta en el inicio del proceso de diseño, de modo que su influencia con respecto a la durabilidad es considerada si es necesario tomar medidas de protección.

4.2.2.3.1 - Verificación ELU. Acción compuesta total entre hormigón y FRP

Para la verificación ELU, se hace referencia al diseño de las curvas tensión-deformación de los materiales constituyentes:

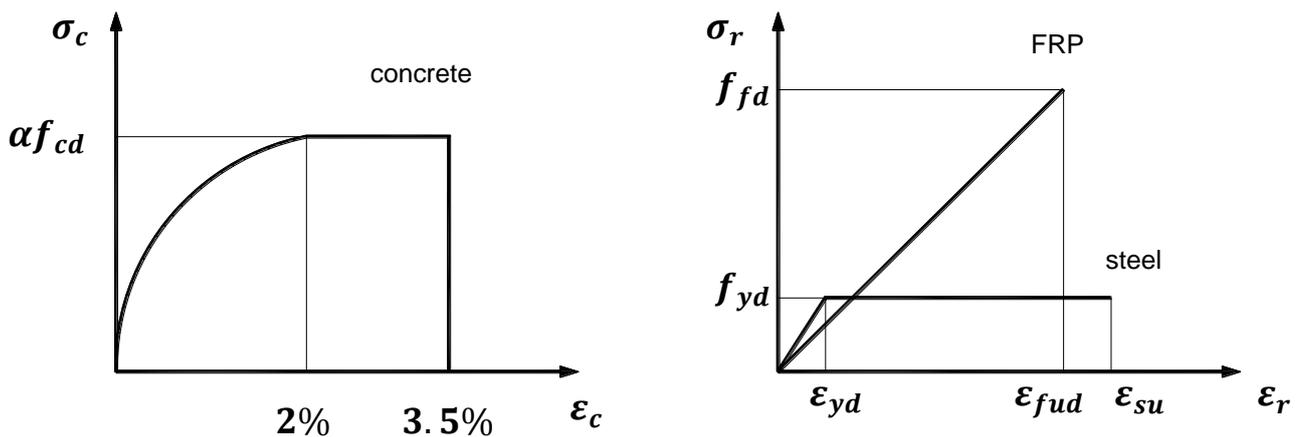


Figura 4.2 Curvas tensión-deformación de los materiales constituyentes en ELU

Los valores de los coeficientes de seguridad para el hormigón y acero se toman del Eurocódigo 2. De esta forma, para el hormigón $\gamma_c = 1'5$ y para el acero $\gamma_s = 1'15$. El comportamiento tensión-deformación de un FRP en la verificación ELU puede ser idealizada por medio de una respuesta lineal, definida como:

$$\sigma_f = E_{fu} \epsilon_f \leq f_{fd}$$

donde E_{fu} es el módulo de elasticidad último.

Cuando el diseño se rige por ELS o un ELU correspondiente a aplastamiento del hormigón o fallo del adhesivo, la deformación del FRP en estado último es bastante limitada. En esta situación, que será frecuente, la tensión del FRP σ_f en ELU es considerablemente inferior que la resistencia, de ahí que el diseño de la resistencia no rige en el diseño global. Para verificar esto o en los casos donde el ELU es determinado por el fallo a tracción del FRP, se hace referencia a la resistencia en el cálculo f_{fd} :

$$f_{fd} = \frac{f_{fk} \varepsilon_{fue}}{\gamma_f \varepsilon_{fum}}$$

Los valores para el factor de seguridad del material FRP se sugieren en la tabla 4.3:

Tipo FRP	Aplicación Tipo A	Aplicación Tipo B
CFRP	1'20	1'35
AFRP	1'25	1'45
GFRP	1'30	1'50

Tabla 4.3 Factores de seguridad γ_f para material FRP

- Aplicación A: Sistemas laminados bajo condiciones normales de control de calidad. Sistema de tejido si se toman las medidas necesarias para obtener un grado alto de control de calidad en condiciones de aplicación e instalación.
- Aplicación B: Sistema de tejido en condiciones normales de control de calidad. Aplicación de cualquier sistema bajo condiciones difíciles de trabajo.

4.2.2.3.2 - Verificación ELU. Fallo del adhesivo

Asumiendo la aplicación adecuada del FRP y el uso correcto de los materiales, el fallo de la unión sucederá en el hormigón. En ELU se hará referencia a la resistencia a tracción y cortante del hormigón con un coeficiente de seguridad γ_{cb} igual a 1'5, tomado del Eurocódigo 2.

El principal modo de fallo de un elemento a flexión será o bien la fluencia del acero/aplastamiento del hormigón (antes que la rotura del FRP o despegue), correspondiente con la zona B de la Fig. 4.4, o bien la fluencia del acero/fallo del FRP (bien rotura o fallo del adhesivo), correspondiente con la zona A de la Fig. 4.4. La figura corresponde a la distribución de deformaciones en ELU donde ε_o es la deformación inicial en la tensión extrema de la fibra antes del refuerzo, $\varepsilon_{f,min}$ es la deformación mínima permisible del FRP en estado límite último y $\varepsilon_{fu,c}$ es la deformación del FRP en la sección crítica en estado último. En caso de que la rotura del adhesivo sea el principal, el valor de $\varepsilon_{fu,c}$ es igual a valor de diseño de la

deformación última del FRP ϵ_{fud} . En caso de fallo del adhesivo, el valor de $\epsilon_{fu,c}$ es igual a la deformación del FRP en la sección crítica cuando sucede el despegue.

Para elementos a flexión, a menudo, el ELS rige el diseño. Esto implica que mayores cantidades de FRP serán aplicadas que las necesarias en ELU. Esto influirá positivamente en la relación de carga última y carga de servicio.

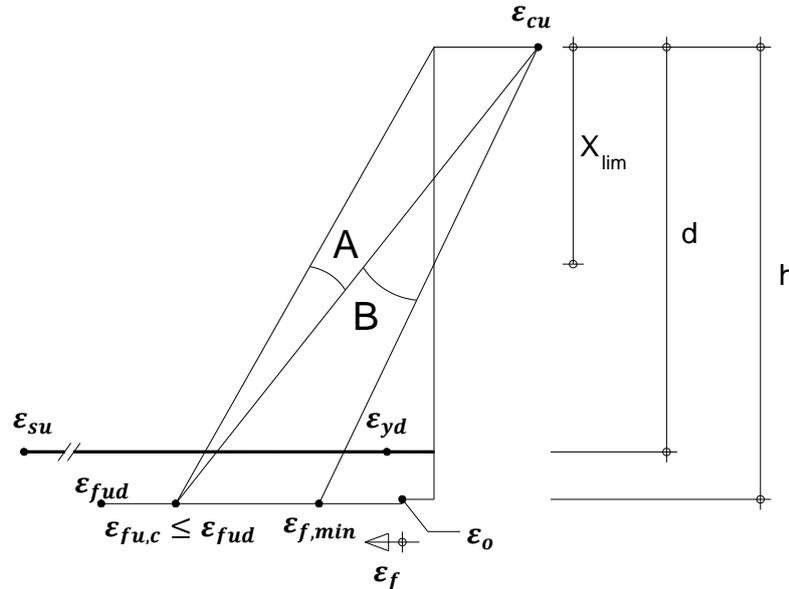


Figura 4.4 Distribución de deformaciones en ELU de la sección crítica de un miembro reforzado a flexión

4.2.3 – Comparativo ACI – FIB

La guía ACI propone un diseño basado en los principios de los estados límite, que establecen niveles de seguridad en estados límite último ELU y estados límite de servicio ELS. De aquí calcularemos la resistencia de un elemento mediante los posibles modos de fallo y los posteriores esfuerzos y tensiones en cada material, con aplicación de los coeficientes reductores que aparecen en la guía ACI 318.

Establece que la estructura existente debe soportar sin aplicar el refuerzo un nivel de carga aceptable de forma que indica un criterio para el cálculo de esta resistencia. De igual modo, en el caso de incendios, donde da por perdidas las propiedades del refuerzo, establece un criterio de cálculo para estimar la resistencia del elemento para ser reforzado con un FRP. Los coeficientes para este cálculo se toman de la guía ACI 216R.

En función de las condiciones del entorno donde va a ser aplicado el refuerzo, establece un coeficiente reductor C_F de resistencia y deformación de la fibra de carbono, además de indicar puede aplicarse revestimiento a los refuerzos para protegerlos del entorno.

En el caso de FIB, exige la verificación en ambos estados límite último y de servicio, estableciendo como prioritario al ELS sobre el ELU en los casos de refuerzo para incremento de la resistencia del elemento y mejora de la capacidad de servicio. Se establece un coeficiente de minoración de resistencia γ_f en función del tipo de refuerzo. Se aplican en todo caso los coeficientes sobre acciones y materiales que aparecen en el Eurocódigo 2.

En el apartado de la verificación en ELU, divide en dos grupos en función del modo de fallo: comportamiento correcto hormigón-CFRP y fallo del adhesivo. De este modo, establece los criterios de cálculo para cada verificación.

Cabe destacar que ambas guías parten de la base de que la estructura existente sin reforzar soporta un mínimo de carga, en concreto ACI establece un criterio para su comprobación, y se hace hincapié en la correcta preparación de la superficie previa a la aplicación del refuerzo y en los estudios previos al cálculo y conocimientos que debe poseer el técnico proyectista. También aparecen comentarios en relación a la durabilidad del sistema y la aplicación de revestimientos protectores del entorno cuando sea necesario; ACI aplica un coeficiente reductor ante estos agentes externos. Por otro lado, también FIB aplica un coeficiente reductor de la resistencia de la fibra para su cálculo en el diseño. Tanto en ACI como en FIB, es válido el comportamiento lineal tensión-deformación de los FRP hasta la rotura.

Como desigualdad entre ambas guías, destacar que los coeficientes de seguridad de las acciones y materiales aplicables a la formulación propuesta de cálculo no son los mismos, y provienen de diferentes directrices, según FIB del Eurocódigo 2 y ACI lo toma de otro apartado también perteneciente al comité, el ACI 318. Como partida, tanto en ACI como en FIB, el cálculo debe basarse en ambos estados límites último y de servicio.

Como resultado de la introducción al cálculo, observamos que el método ACI nos formula dos criterios, de resistencia estructural y al fuego, que debe cumplir la estructura existente antes de aplicar el refuerzo, así como un coeficiente reductor de las propiedades del refuerzo en función del ambiente al que va a ser expuesto. Esto no aparece en la guía FIB, donde se nos orienta directamente a la comprobación de los estados ELS y ELU, este último separado en dos procedimientos en función del modo de fallo, y donde establece un factor reductor en la resistencia en función de la fibra de refuerzo a utilizar y el modo de empleo.

A continuación, vamos a analizar los criterios para refuerzo a flexión que aparecen en las dos guías para posteriormente, en el apartado 7, aplicar sobre un ejemplo práctico y extraer conclusiones de los resultados obtenidos.

4.3 - CRITERIOS PARA REFUERZO A FLEXIÓN DE VIGAS

4.3.1 - ACI 440

Se presenta la guía de cálculo de un refuerzo a flexión con la adición de un refuerzo longitudinal de fibra de carbono CFRP en la cara traccionada de la viga. El refuerzo mediante CFRP proporcionará un incremento en la resistencia a flexión. Se

ha documentado que el incremento, teniendo en cuenta factores como la ductilidad y límites de la capacidad de servicio, será de entre el 5 y 40%.

Daremos una visión general de los conceptos tomando como base una viga de sección rectangular existente reforzada en su cara traccionada. Los conceptos que se explican pueden extenderse también a secciones no rectangulares (secciones I o T) y a elementos con armadura de acero trabajando a compresión.

4.3.1.1 - Hipótesis

- Los cálculos de diseño se basan en las dimensiones reales, disposición de la armadura interna y las propiedades del material existente en carga.
- Las tensiones en el hormigón y en el refuerzo son directamente proporcionales a la distancia del eje neutro, es decir, una sección plana antes de entrar en carga permanece plana después de entrar en carga.
- No existe deslizamiento entre el refuerzo externo de FRP y el hormigón, el refuerzo está perfectamente adherido al hormigón.
- La deformación de cizalladura del adhesivo es despreciable ya que esta capa es muy delgada con muy ligeras o escasas variaciones en su espesor
- La máxima tensión a compresión admitida para el hormigón es igual a 0'003 (0,30%).
- No se contabiliza la resistencia a tracción del hormigón.
- El refuerzo FRP tiene un comportamiento elástico lineal de tensiones y deformaciones hasta la rotura.

Cuando un refuerzo de FRP está siendo aplicado para incrementar la resistencia a flexión de un elemento, es muy importante verificar que el elemento será capaz de resistir los esfuerzos cortantes asociados con el incremento de la resistencia a flexión. Este es un tema importante a tener en cuenta al momento de realizar el diseño del refuerzo de una sección a flexión ya que es necesario determinar si el elemento es capaz de resistir esta fuerza cortante asociada al incremento de las solicitaciones a flexión, puesto que la fibra sería solo útil a flexión y no a corte. De lo contrario se requeriría disponer una fibra adicional de manera transversal para realizar un refuerzo a corte.

A menos que todas las cargas de un elemento, incluyendo su propio peso y cualquier fuerza de pretensado, sean eliminadas antes de la instalación del refuerzo, el sustrato al cual el FRP es aplicado, estará deformado. Dichas deformaciones deben ser consideradas como deformaciones iniciales y deben ser excluidas de la deformación en el FRP. El nivel de deformación inicial del sustrato ϵ_{bi} puede ser determinado a partir de un análisis elástico del elemento existente, considerando todas las cargas que actúan sobre el elemento, durante la instalación del sistema FRP. Se recomienda que el análisis elástico del elemento existente esté basado en las propiedades de la sección fisurada.

$$\epsilon_{bi} = \frac{M_{dl}(h - kd)}{I_{cr}E_c}$$

4.3.1.2 - Resistencia nominal

En el momento de diseñar la resistencia a flexión debe verificarse que el momento a flexión de diseño sea mayor que el momento a flexión requerido. La resistencia a flexión de diseño ϕM_n , hace referencia a la resistencia nominal del elemento estructural multiplicado por un factor de reducción, mientras que la resistencia a flexión requerido, M_u , está vinculada a los efectos de cargas mayoradas, tal y como aparece en ACI 318.

De acuerdo a lo anterior, ACI 318 propone un coeficiente reductor de resistencia, ϕ , y otro coeficiente reductor de resistencia adicional de 0'85 aplicado únicamente a la contribución a flexión del FRP ($\psi_f=0'85$).

$$\phi M_n \geq M_u$$

La capacidad que tiene un elemento estructural con FRP a flexión puede determinarse con la compatibilidad de deformaciones, el equilibrio interno de fuerzas y control del modo de fallo.

4.3.1.2.1 - Modos de fallo

La resistencia a flexión de una sección depende del control del modo de fallo. Estos modos de fallo deben investigarse:

- Aplastamiento del hormigón a compresión antes de alcanzar el límite elástico del acero.
- Alcance del límite elástico del acero en tensión seguido por la rotura de la lámina FRP.
- Alcance del límite elástico del acero en tensión seguido por el aplastamiento del hormigón.
- Delaminación por cortante o flexión del recubrimiento de hormigón.
- Despegue del FRP del sustrato de hormigón.

El aplastamiento del hormigón se producirá si la tensión a compresión en el hormigón alcanza su valor máximo ($\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0'003$). La rotura del laminado ocurrirá si la tensión en el FRP alcanza su tensión de rotura de diseño ($\epsilon_f = \epsilon_{fu}$) antes de que el hormigón alcance su tensión máxima.

La delaminación del recubrimiento de hormigón o el despegue del FRP ocurrirán si la fuerza aplicada en el FRP no se puede sostener por el sustrato. Para prevenir el despegue del laminado FRP, se debe limitar el nivel de deformación desarrollado en el laminado. La ecuación da un coeficiente de dependencia del adhesivo κ_m :

$$\kappa_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360.000} \right) \leq 0'90 \text{ para } nE_f t_f \leq 180.000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90.000}{nE_f t_f} \right) \leq 0'90 \text{ para } nE_f t_f \leq 180.000 \end{cases}$$

El término κ_m es un factor no mayor de 0'90 que debe multiplicarse por la tensión de rotura del laminado FRP hasta alcanzar la limitación de tensión para evitar el despegue. El número de laminados n utilizados en esta ecuación corresponde a los que se aplicarán en el refuerzo a flexión en el punto donde se calcula el momento.

4.3.1.2.2 - Nivel de deformación en el refuerzo FRP

Debido a que los materiales FRP son linealmente elásticos hasta el fallo, el nivel de deformación dictará el nivel de tensión desarrollado en el FRP. El máximo nivel de deformación que se puede lograr en un refuerzo FRP se regirá por el nivel de deformación desarrollado en el FRP en el punto donde el hormigón agrieta, el punto donde rompe el FRP o el punto donde el FRP se despegga del sustrato. La deformación máxima o el nivel de deformación eficaz del refuerzo FRP en ELU es:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu}$$

donde ε_{bi} es la deformación inicial del sustrato.

4.3.1.2.3 - Nivel de tensión en el refuerzo FRP

El nivel de tensión eficaz en el refuerzo es el máximo nivel de tensión que puede desarrollarse en el refuerzo antes del fallo a flexión de la sección. Esta tensión eficaz puede encontrarse en el nivel de deformación del FRP, suponiendo un comportamiento elástico perfecto.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

4.3.1.3 - Ductilidad

El uso del sistema FRP adherido externamente para el refuerzo a flexión reducirá la ductilidad del elemento original. En algunos casos, la pérdida de ductilidad es insignificante. No obstante, a las secciones que experimentan una pérdida representativa en la ductilidad se les debe prestar especial atención. Para mantener un grado suficiente de ductilidad, se debe verificar el nivel de deformación del acero en el

estado límite último. Se obtiene ductilidad adecuada si la deformación del acero en el punto de aplastamiento del hormigón o de fallo del FRP, incluyendo delaminación o desprendimiento, alcanza un valor de al menos 0'005.

El enfoque tomado en el presente estudio sigue la filosofía de ACI 318 Apéndice B, donde una sección con baja ductilidad debe ser compensada con una alta reserva de resistencia. La mayor reserva de resistencia es lograda mediante la aplicación de un factor de reducción de resistencia de 0'70 a las secciones frágiles, en oposición a 0'90 para secciones dúctiles. Por lo tanto, debe utilizarse un factor de reducción de resistencia dado por la ecuación, donde ϵ_s es la deformación del acero en el estado límite último:

$$\phi = \begin{cases} 0'90 & \text{para } \epsilon_s \geq 0'005 \\ 0'70 + \frac{0'20(\epsilon_s - \epsilon_{sy})}{0'005 - \epsilon_{sy}} & \text{para } \epsilon_{sy} < \epsilon_s < 0'005 \\ 0'70 & \text{para } \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} \end{cases}$$

Esta ecuación fija el factor de reducción en 0'90 para secciones dúctiles y 0'70 para secciones frágiles donde el acero no alcanza la deformación de límite elástico, y proporciona una transición lineal para el factor entre estos dos extremos, Fig. 4.5:

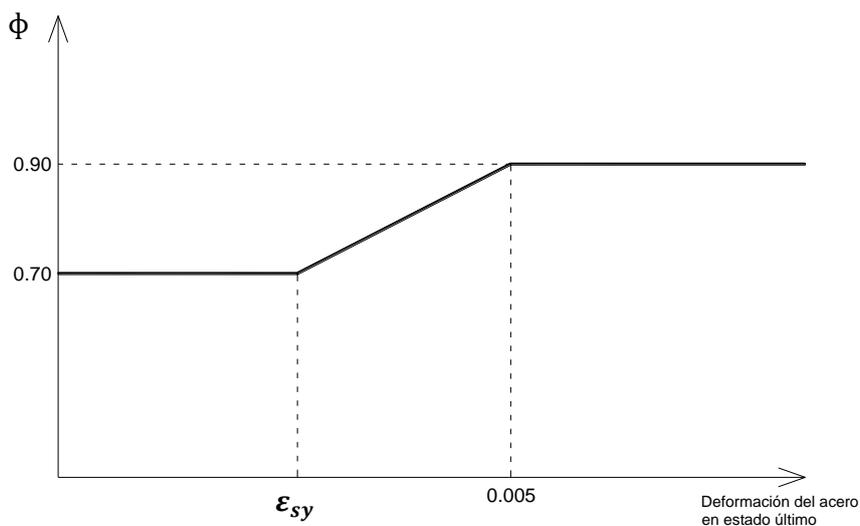


Figura 4.5 Representación gráfica del coeficiente reductor de resistencia como función de la ductilidad

4.3.1.4 - Capacidad de servicio

La capacidad de servicio de un miembro (deflexiones, anchos de grieta) bajo cargas de servicio debe satisfacer las disposiciones aplicables en ACI 318. Para evitar deformaciones inelásticas de los miembros de hormigón reforzados con FRP, debe impedirse superar el límite elástico en el acero interno existente bajo niveles de cargas de servicio. La tensión del acero bajo cargas de servicio debe limitarse al 80% del límite elástico, como se muestra:

$$f_{s,s} \leq 0.80f_y$$

4.3.1.5 - Aplicación a una sección rectangular reforzada

Para ilustrar los conceptos presentados, esta sección describe la aplicación en una sección rectangular reforzada.

4.3.1.5.1 - Resistencia última

La Fig 4.6 refleja la distribución interna de tensiones y deformaciones de una sección rectangular a flexión en estado límite último:

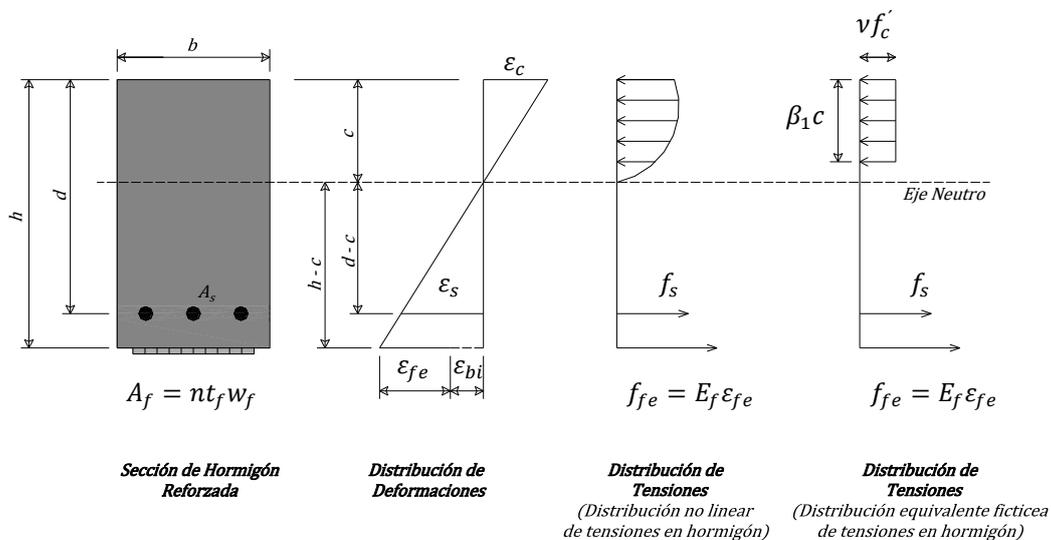


Figura 4.6 Distribución interna de tensiones y deformaciones de una sección rectangular a flexión en estado límite último

El procedimiento de cálculo utilizado para llegar a la resistencia última debe satisfacer la compatibilidad de deformaciones y equilibrio de fuerzas y considerar el principal modo de fallo. El procedimiento descrito en este documento es un procedimiento tal que ilustra un método de ensayo y error.

El procedimiento de ensayo y error implica seleccionar una profundidad supuesta del eje neutro, c ; cálculo del nivel de deformación en cada material aplicando

la compatibilidad de deformaciones; cálculo del nivel de deformación asociado en cada material; y comprobación del equilibrio de fuerza internas. Si las resultantes de fuerzas internas no llegan a equilibrio, debe revisarse la profundidad del eje neutro y repetir el proceso.

Para una supuesta profundidad del eje neutro, el nivel de deformación del FRP puede calcularse de la ecuación que hemos visto en apartado de deformación del FRP. Esta ecuación considera el principal modo de fallo para la supuesta profundidad del eje neutro. Si domina el primer término de la ecuación, el aplastamiento del hormigón controla el fallo a flexión de la sección. Si domina el segundo término, el fallo del FRP (rotura o despegue) controla el fallo a flexión de la sección:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq K_m \varepsilon_{fu}$$

El nivel de deformación eficiente en el refuerzo puede hallarse a partir del nivel de deformación del mismo, suponiendo un comportamiento elástico perfecto:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

En base al nivel de deformación del FRP, puede calcularse la deformación del acero mediante compatibilidad de deformaciones:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right)$$

La tensión en el acero se calcula a partir del nivel de deformación del mismo, suponiendo un comportamiento elasto-plástico.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

Determinados los niveles de tensión y deformación en acero y FRP para una supuesta profundidad del eje neutro, el equilibrio de fuerzas internas se debe comprobar con la siguiente ecuación:

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c \beta_1 b}$$

Los coeficientes de la ecuación γ y β_1 se toman de los valores que aparecen en la guía ACI 318, para todos los tipos de fallo.

La resistencia a flexión nominal de la sección con refuerzo FRP se calcula mediante la siguiente ecuación, donde se aplican el coeficiente reductor de resistencia ϕ y el factor adicional de reducción ψ_f a la contribución del FRP en el refuerzo a flexión ($\psi_f = 0'85$):

$$\phi M_n = \phi \left[A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \right]$$

4.3.1.5.2 - ELS. Tensión en el acero bajo cargas de servicio

Mediante un análisis elástico de fisuración en la sección de hormigón reforzada podemos calcular la tensión en el acero, como indica la ecuación:

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)}$$

La tensión en acero bajo carga calculada en la ecuación debe ser comparada con los límites descritos anteriormente en el apartado 4.3.1.4 Capacidad de servicio, donde:

$$f_{s,s} \leq 0'80 f_y$$

4.3.1.6 - Análisis de los criterios ACI

ACI parte de la base de estudio de una viga de sección rectangular reforzada en su cara traccionada mediante la aplicación del refuerzo FRP. Para ello, asume una serie de hipótesis en aras de facilitar el cálculo, que incluso no reflejan el comportamiento real del refuerzo (valga como ejemplo que sí existirá un relativo deslizamiento en el FRP y el sustrato), si bien no afectan significativamente al cálculo a flexión del elemento.

A continuación, ACI comenta que el incremento de esfuerzos a flexión de la viga, originará el incremento también del cortante, y que en caso de que el miembro presente ya una deformación, ésta debe ser considerada como la inicial en el cálculo. Estos datos deben tenerse en cuenta en el momento del diseño.

Se establece criterio de resistencia a aplicar en el diseño a flexión, donde el momento de diseño, con coeficiente reductor, debe ser mayor que el momento requerido. La determinación se hará mediante compatibilidad de deformaciones, equilibrio interno de fuerzas y control del modo de fallo. Todos los coeficientes sobre las acciones, ACI los toma de su apartado ACI 318.

La resistencia a flexión de una sección depende del control del modo de fallo, ACI plantea cinco modos de fallo que deben ser analizados. Para evitar el caso concreto de fallo por despegue del laminado o delaminación del recubrimiento, ACI plantea una limitación de la deformación del refuerzo para prevenir este despegue que debe ser tomada en el cálculo.

La guía ACI establece el comportamiento linealmente elástico hasta el fallo de los FRP, de ahí que la exigencia en los niveles de tensión y deformación del FRP serán dependientes el uno del otro de este comportamiento y, en concreto, el nivel de deformación dictará el nivel de tensión.

El refuerzo FRP reduce la ductilidad del miembro, que también depende de la deformación de acero. El criterio de ACI es que la baja ductilidad debe ser compensada por una reserva de resistencia y por este hecho establece un coeficiente que reduce en mayor grado la resistencia a las secciones frágiles que las dúctiles, de forma que va a exigir una mayor reserva de resistencia de las primeras.

En relación a la capacidad de servicio, ACI limita la tensión del acero al 80% de su límite elástico.

Por último se establece un procedimiento para el cálculo del refuerzo a flexión de vigas de sección rectangular en ELU, con el cálculo de la resistencia última, el cálculo en base a una supuesta profundidad del eje neutro (área comprimida), la compatibilidad de deformaciones, nivel de deformación asociado a cada material, equilibrio de fuerzas y la resistencia a flexión nominal de la sección reforzada. En este punto, ACI establece la aplicación de un coeficiente reductor adicional $\psi_f = 0.85$. Posteriormente, se comprueba la tensión en el acero en ELS.

En caso de no cumplir cualquiera de los requisitos, se debe revisar la profundidad del eje neutro y volver a realizar el cálculo. Todos los coeficientes aplicables a la formulación, se toman del apartado ACI 318.

En base a este análisis, podemos resumir el procedimiento de diseño:

- Análisis del comportamiento de la estructura sin reforzar. En caso de no cumplir los requerimientos de cargas, plantear propuesta de refuerzo mediante sistema FRP.
- Comprobar que el nivel de resistencia del elemento a reforzar satisface los criterios iniciales de límite de resistencia y resistencia contra el fuego.
- Calcular las propiedades resistentes y de deformación de cálculo del sistema FRP, aplicando el coeficiente reductor en función del entorno.
- Cálculos preliminares de las propiedades del hormigón, acero y FRP.
- Determinar el estado existente de deformación del sustrato.
- Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema FRP.
- Estimar la profundidad del eje neutro c (Un valor razonable corresponde a $0.20d$).
- Determinar el nivel de deformación eficaz en el refuerzo.

- Calcular la deformación del acero existente.
- Calcular el nivel de tensión en acero y FRP.
- Calcular las resultantes de fuerzas internas y comprobar el equilibrio.
- Ajustar el valor de c hasta que se satisfaga el equilibrio de fuerzas. Repetir los pasos con diferentes valores de c hasta conseguir el equilibrio de fuerzas.
- Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección.
- Comprobar las tensiones en servicio del acero y FRP (sólo casos de cargas cíclicas).

4.3.2 - Bulletin 14 FIB

Las curvas tensión-deformación del hormigón, FRP y acero junto con el supuesto que el deslizamiento en la interfase hormigón-FRP debe ser ignorado forman la base del análisis del estado límite último de los elementos reforzados a flexión. El eje central para el análisis de estos elementos es la identificación de todos los posibles modos de fallo.

4.3.2.1 - Modos de fallo. ELU

Pueden ser divididos en dos clases:

- a) Aquellos donde el trabajo compuesto del material FRP y el hormigón se mantiene hasta que el hormigón alcanza la fisuración a compresión o el FRP falla bajo tensión.
- b) Aquellos donde la acción del material compuesto se pierde antes de los fallos de tipo a). Por ejemplo, debidos al desprendimiento del FRP.

Se describe a continuación cada modo de fallo.

4.3.2.1.1 - Acción completa del material compuesto

Fallo 1. Alcance del límite elástico del acero en tensión seguido del aplastamiento del hormigón:

La resistencia a flexión debe conseguirse con el alcance del límite elástico del acero seguido de aplastamiento del hormigón en la zona de compresión, mientras el refuerzo se mantiene intacto.

Fallo 2. Alcance del límite elástico del acero en tensión seguido de la rotura de la lámina FRP:

Para relativamente bajas proporciones de acero y FRP, el fallo a flexión debe ocurrir al alcanzar el límite elástico del acero seguido de la rotura del FRP.

Fallo 3. Aplastamiento del hormigón:

Es un modo de rotura frágil y ciertamente no deseable. En este caso el refuerzo FRP es de pequeña utilidad y deben considerarse medios para incrementar la resistencia a compresión del hormigón.

4.3.2.1.2 - Pérdida de la acción del material compuesto

Fallo 4. Despegue y modos de fallo del adhesivo:

El adhesivo es necesario para transferir las cargas desde el hormigón al sistema FRP, de ahí que los modos de fallo del adhesivo deben tenerse en cuenta como es debido. El fallo del adhesivo en sistemas de refuerzo adherido en el exterior implica la pérdida completa de la acción del material compuesto y sucede en la interfase entre el refuerzo FRP y el sustrato de hormigón. Por otro lado, un despegue localizado, indica un fallo local del adhesivo entre el refuerzo y el hormigón. Los despegues localizados no son en sí mismos un modo de fallo que definitivamente cause la pérdida de la capacidad portante en un elemento reforzado con FRP.

Cuando un despegue localizado se propaga y se pierde la acción del material compuesto de forma que el refuerzo pierde su capacidad de soportar esfuerzos, este fallo se conoce como desprendimiento. Si no hay posibilidad de redistribuir los esfuerzos desde el refuerzo exterior adherido FRP al refuerzo interno, acero, el desprendimiento provocará un fallo frágil y rápido.

El fallo del adhesivo puede suceder en diferentes fases entre el hormigón y el refuerzo externo FRP, como se describe a continuación:

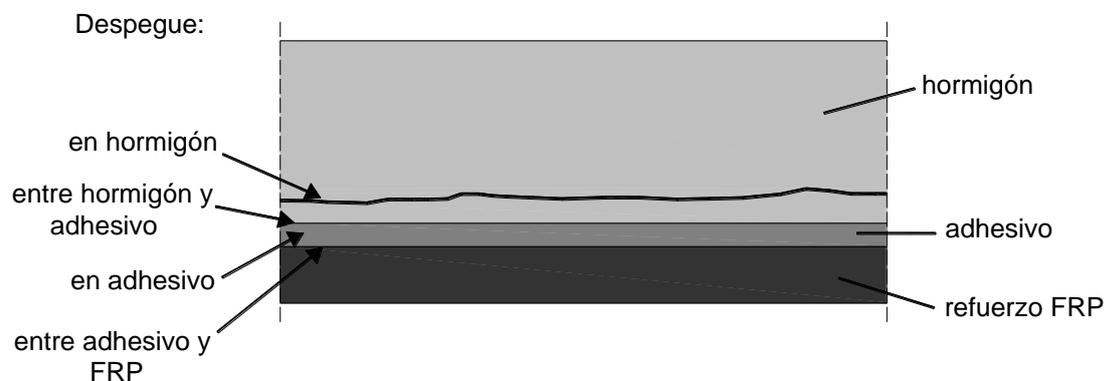


Figura 4.7 Diferentes interfases de fallo en la unión

- Despegue en el hormigón cerca de la superficie o a lo largo de la capa debilitada, por ejemplo, en la línea de la armadura de acero.

- Despegue en el adhesivo (fallo de cohesión). Como la resistencia a tracción y cortante del adhesivo epoxi es usualmente mayor que las del hormigón armado, el fallo se producirá normalmente en el hormigón. En este caso, una fina capa de hormigón (de unos pocos milímetros de grueso) permanecerá en el refuerzo FRP. El despegue debe suceder a través del adhesivo si su resistencia cae por debajo de la del hormigón. Por ejemplo, altas temperaturas o cuando la resistencia del hormigón es inusualmente muy alta.

- Despegue en las interfaces entre el hormigón y adhesivo o entre adhesivo y FRP (fallo de adhesión). Estos fallos de adherencia solo sucederán si no ha habido la suficiente preparación de la superficie del soporte durante la instalación del refuerzo FRP porque la fuerza de cohesión en las resinas epoxi es inferior a la fuerza de adhesión.

- Despegue en el interior del FRP (fallo a cortante interlaminar). Debido a que el FRP es un material compuesto en sí mismo, el despegue puede también ocurrir dentro del FRP entre las fibras y la resina. El mecanismo de fallo ocurrirá con la propagación de la fisura en el FRP. No obstante, el fallo interlaminar es un modo de fallo secundario que sucede después de que la fisura del adhesivo se ha iniciado en el hormigón y, por lo tanto, no determina normalmente la resistencia del adhesivo.

4.3.2.1.3 - Comportamiento del adhesivo con elementos de hormigón reforzado con FRP

Muchos fallos observados en ensayos de elementos de hormigón armado reforzados con FRP sometidos a flexión se producen por el desprendimiento del refuerzo. Como se ha comentado, el punto más débil en el adhesivo entre el refuerzo y el hormigón es en la capa del hormigón cercana a la superficie.

De ahí que ahora nos centraremos en los modos de fallo relacionados con la superficie del hormigón. Dependiendo del punto de arranque del proceso de despegue, los consecuentes modos de fallo pueden ser identificados. Estos modos de fallo aparecen reflejados en la Fig. 4.8.

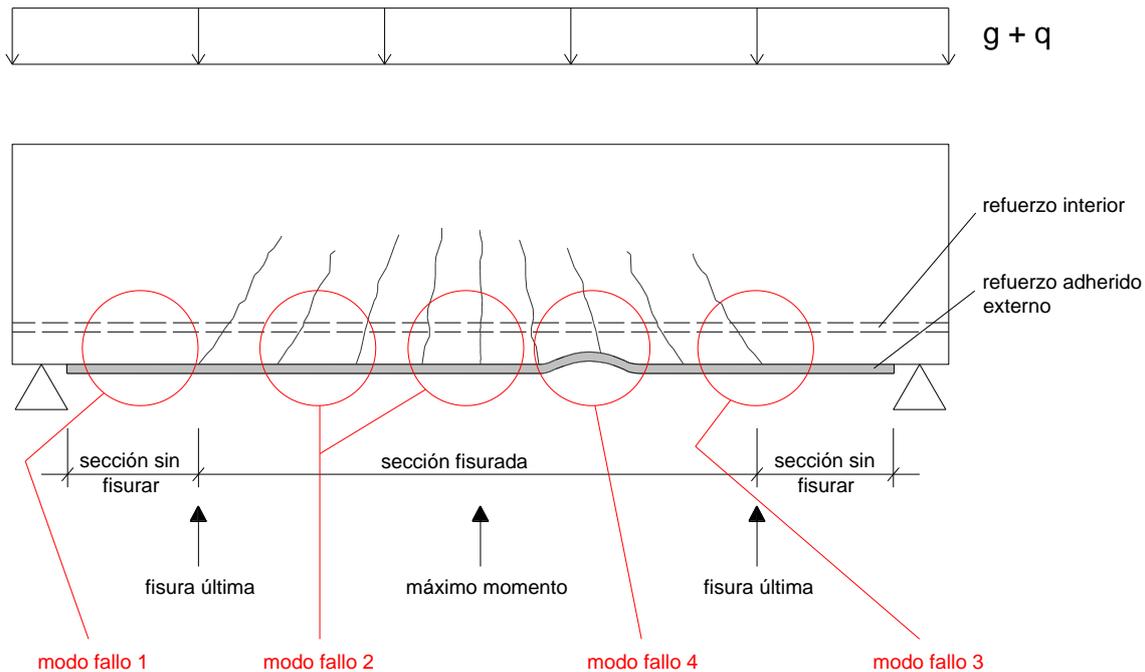


Figura 4.8 Modos de fallo del adhesivo en un elemento de hormigón con CFRP

- Modo 1: Desprendimiento en zona de anclaje sin fisurar.

El CFRP puede desprenderse en la zona de anclaje como resultado de la grieta a cortante en el adhesivo a través del hormigón.

- Modo 2: Desprendimiento causado en las fisuras de flexión.

Las fisuras a flexión (verticales) en el hormigón pueden propagarse horizontalmente y de este modo causar desprendimiento en el FRP en zonas lejanas del anclaje.

- Modo 3: Desprendimiento causado en las fisuras de cortante.

Las fisuras a cortante en el hormigón generalmente resultan en dirección horizontal y vertical, que pueden conducir al desprendimiento del FRP.

- Modo 4: Desprendimiento causado por irregularidades de la superficie de hormigón.

Las irregularidades o asperezas de la superficie de hormigón pueden conducir a un despegue del FRP, que se propagará provocando el desprendimiento.

4.3.2.1.4 - Fallo a cortante al final del FRP

Ensayos de varios investigadores indican que cuando los laminados adheridos externamente finalizan a cierta distancia de los soportes, como es el caso típico de las aplicaciones de refuerzos en vigas, una fisura vertical cercana puede iniciarse al final

del laminado y después crecer como una grieta inclinada de cortante (Figura 4.9, izquierda).

Sin embargo, en virtud del armado de estribos internos, la fisuración a cortante puede ser detenida y la lámina adherida puede separarse del hormigón en forma de astillas (Figura 4.9, derecha). Este último modo de fallo se conoce como arrancado. Ambos mecanismos de fallo se activarán cuando el esfuerzo cortante máximo cercano al final del laminado alcance un valor crítico.

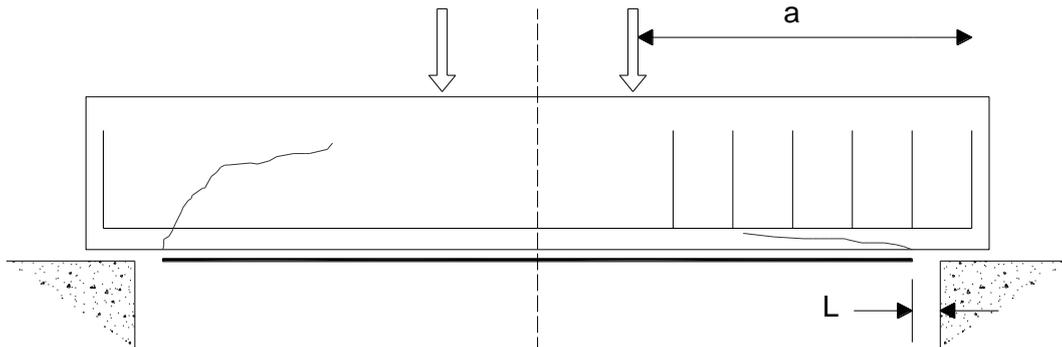


Figura 4.9 Fallo a cortante en final de laminado CFRP

4.3.2.2 - Análisis de ELU

4.3.2.2.1 - Acción completa del material compuesto

4.3.2.2.1.1 - Alcance del límite elástico del acero en tensión seguido del aplastamiento del hormigón

El momento de diseño a flexión de la sección reforzada se calcula en base a los principios de cálculo del hormigón. (Ver Fig. 4.10). Primero, la profundidad del eje neutro x , calculada con la compatibilidad de deformaciones y equilibrio de fuerzas interno, y luego el momento de diseño se obtiene por equilibrio de momentos. El análisis debe tener en cuenta que el miembro de hormigón no puede estar descargado completamente cuando se aplica el refuerzo y de ahí que debe considerarse una deformación inicial ϵ_0 .

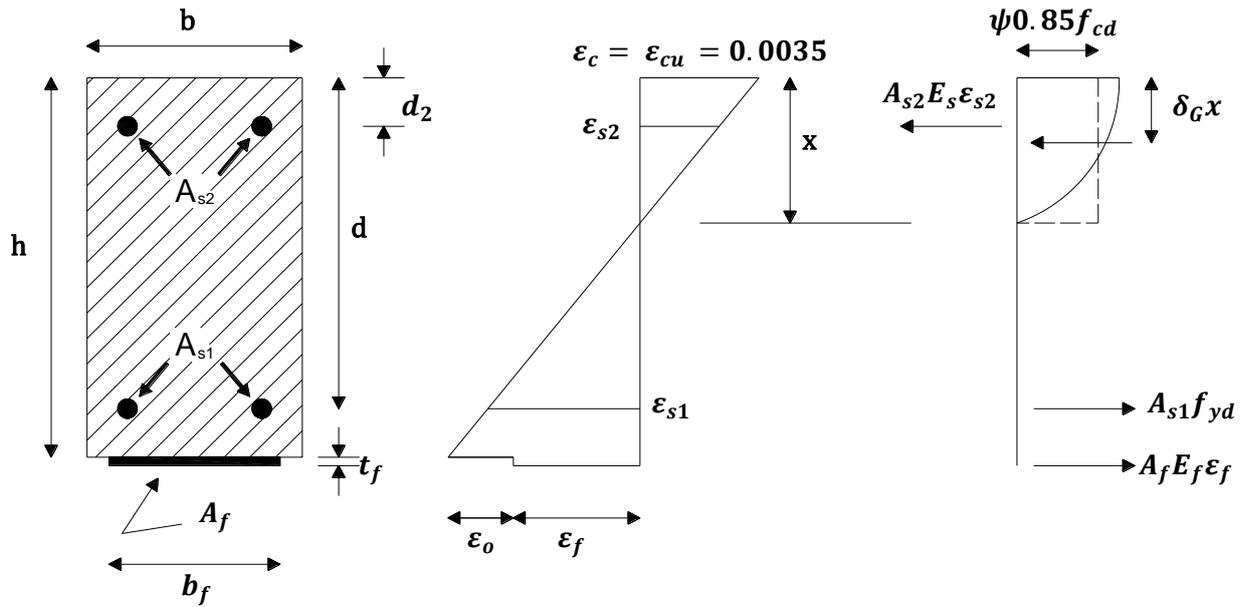


Figura 4.10 Análisis de la sección para estado límite último a flexión: geometría, distribución de deformaciones y distribución de tensiones

La capacidad del momento de diseño a flexión debe calcularse en base a:

- Cálculo de la profundidad del eje neutro, x :

$$0.85\psi f_{cd} bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_fE_f\varepsilon_f$$

donde:

$$\psi = 0.8$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x} \quad (E_s\varepsilon_{s2} \text{ que no exceda } f_{yd})$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0$$

- Cálculo de la capacidad del momento a flexión:

$$M_{Rd} = A_{s1}f_{yd}(d - \delta_G x) + A_fE_f\varepsilon_f(h - \delta_G x) + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2}(\delta_G x - d_2)$$

donde:

$$\delta_G = 0.4$$

Para que estas ecuaciones sean correctas, los siguientes supuestos deben ser comprobados: límite elástico del acero a tracción y la deformación del FRP está limitada a la deformación última, ϵ_{fud} :

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

$$\epsilon_f = \epsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fud}$$

4.3.2.2.1.2 - Alcance del límite elástico del acero en tensión seguido de la rotura de la lámina FRP

El modo de fallo relacionado con el límite elástico del acero/rotura del FRP es teóricamente posible. Sin embargo, es muy probable que un prematuro despegue del FRP precederá a la rotura del mismo y de ahí que este mecanismo no se active. Podemos afirmar que el análisis de este mecanismo puede ser hecho a lo largo de las líneas de la sección anterior.

Aplicamos el proceso y las ecuaciones anteriores, con las siguientes modificaciones: ϵ_{cu} se sustituye por ϵ_c , ϵ_f se sustituye por ϵ_{fud} , y ψ , δ_G son proporcionados por las expresiones:

$$\psi = \begin{cases} 1.000\epsilon_c \left(0.5 - \frac{1000}{12}\epsilon_c \right) & \text{para } \epsilon_c \leq 0.002 \\ 1 - \frac{2}{3000\epsilon_c} & \text{para } 0.002 \leq \epsilon_c \leq 0.0035 \end{cases}$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8-1.000\epsilon_c}{4(6-1.000\epsilon_c)} & \text{para } \epsilon_c \leq 0.002 \\ \frac{1.000\epsilon_c(3.000\epsilon_c-4)+2}{2.000\epsilon_c(3.000\epsilon_c-2)} & \text{para } 0.002 \leq \epsilon_c \leq 0.0035 \end{cases}$$

4.3.2.2.2 - Pérdida de la acción del material compuesto

4.3.2.2.2.1 - Desprendimiento causado en las fisuras de cortante

Las fisuras de cortante son inclinadas y están asociadas con desplazamientos de apertura horizontal y vertical. Como hemos visto, las fisuras horizontales por cortante pueden resultar en desprendimiento. También sucede en las verticales ya que induce tensión directa en la capa de hormigón entre el refuerzo y la armadura interna.

El desprendimiento causado por fisuras de cortante aún no ha sido cuantificado de forma detallada por investigadores. En el Eurocódigo 2 aparece una propuesta de forma que puede prevenirse limitando la fuerza de cizallamiento que actúa a la resistencia al esfuerzo cortante del hormigón sin el refuerzo, con la correspondiente modificación de la resistencia característica a cortante del hormigón τ_{Rk} y la relación equivalente de refuerzo longitudinal ρ_{cq} :

$$\tau_{Rk} = 0'15f_{ck}^{1/3}$$

$$\rho_{cq} = \frac{A_s + A_f \frac{E_f}{E_s}}{bd}$$

En caso de que la capacidad a cortante de diseño caiga por debajo del requerido, un adecuado medio de refuerzo a cortante debe ser proporcionado.

4.3.2.2.2 - Desprendimiento al final del anclaje y en las fisuras de flexión

El tratamiento para el desprendimiento al final del anclaje y en las fisuras de flexión se puede realizar de acuerdo con diversos enfoques.

- Enfoque 1. Verificación al final del anclaje y limitación de deformación en el FRP:

Un enfoque para prevenir el desprendimiento es restringir la deformación última en ELU del FRP a un valor. Además, el anclaje final debe ser verificado en base al esfuerzo cortante-deslizamiento en la interfase hormigón-FRP. La limitación de deformación que aparecen en algunas directrices de diseño y aprobaciones técnicas van desde 0'0065 a 0'0085.

Se presenta el siguiente modelo para la verificación al final del anclaje, donde nos indica la máxima fuerza del FRP que puede ser anclada $N_{fa,max}$ y la máxima longitud de anclaje $l_{b,max}$:

$$N_{fa,max} = \alpha c_1 k_c k_b b \sqrt{E_f t_f f_{ctm}}$$

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}}$$

donde α es un factor reductor, aproximadamente igual a 0'9, k_c es un factor en función del estado de compactación del hormigón, generalmente igual a 1'0, y k_b es un factor geométrico:

$$k_b = 1.06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1$$

con $b_f/b \geq 0'33$. c_1 es igual a 0'64 y c_2 a 2'0 para laminados de fibra de carbono. Los valores b , b_f y t_f se miden en mm. y E_f y f_{ctm} en Mpa.

Para longitudes de unión $l_b < l_{b,max}$, la fuerza última en adhesivo se calcula:

$$N_{fa} = N_{fa,max} \frac{l_b}{l_{b,max}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right)$$

- Enfoque 2. Verificación de acuerdo con la línea de la envolvente de los esfuerzos de tracción en el FRP:

En este enfoque se trata el desprendimiento de forma unificada al final del anclaje y en cualquier punto a lo largo de la interfase FRP-hormigón. El objetivo es calcular el incremento máximo posible de tracción sin el refuerzo exterior que puede ser transferido por medio de tensiones de adherencia entre dos grietas consecutivas a flexión. Este aumento debe compararse con el aumento acorde al diseño asumiendo la acción compuesta total.

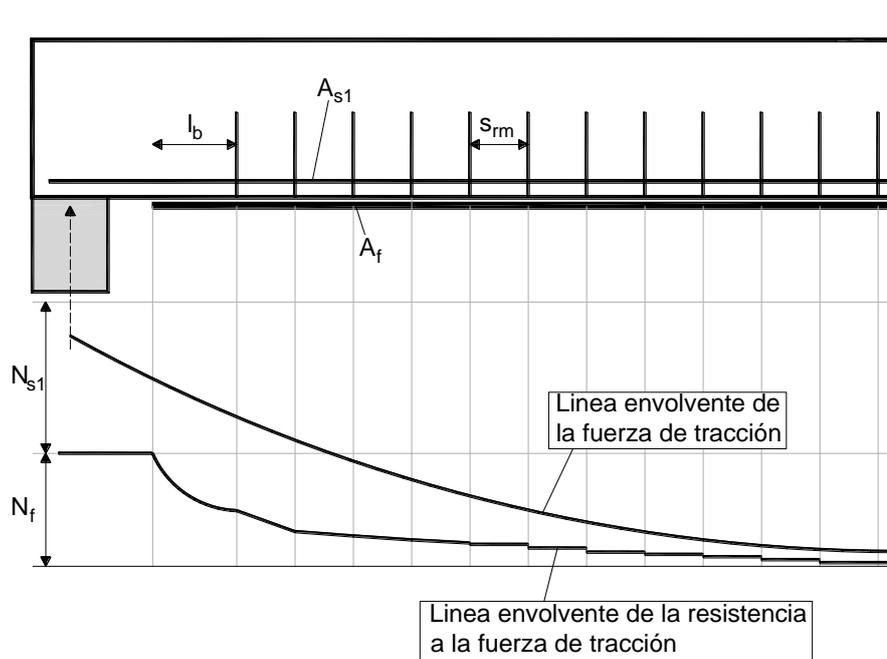


Figura 4.11 Línea envolvente de las fuerzas resistentes a la tracción

Este enfoque consiste en tres pasos:

- 1- Determinación del espacio más desfavorable de grietas a flexión.
- 2- Determinación de la tensión de tracción sin el refuerzo entre dos grietas consecutivas de acuerdo con el diseño a flexión.
- 3- Determinación del incremento máximo posible a tracción en el refuerzo.

Paso 1: Determinación del espacio más desfavorable de grietas a flexión.

El espacio entre dos grietas consecutivas es igual de 1 a 2 veces la longitud de transmisión l_t y debe calcularse asumiendo constantes medias de tensiones de adherencia entre el refuerzo interno (acero) y el externo. La tensión media de adherencia del refuerzo interno τ_{sm} puede determinarse de acuerdo con Eurocódigo 2:

$$\tau_{sm} = 2,25f_{ck,0.95} = 1,85f_{ctm}$$

La tensión media en el refuerzo externo se calcula:

$$\tau_{fm} = 0,44f_{ctm}$$

La longitud de transmisión se calcula mediante las siguientes ecuaciones, donde M_{cr} es el momento de flexión que ocasiona grietas. Para simplificar el cálculo, debe asumirse un espaciado constante entre grietas en toda la longitud de la viga. Como las tensiones de adherencia que pueden ser transferidas en una zona de hormigón sin fisuras está restringida debido a la limitación de la energía de rotura, el

espaciado grande entre grietas no es favorable. De ahí que el espacio puede corresponder a 2 veces la longitud de transmisión.

$$s_m = 2l_t = 2 \frac{M_{cr}}{z_m (\sum \tau_{fm} b_f + \sum \tau_{sm} d_s \pi)}$$

$$M_{cr} = \frac{k f_{ctk,0.95} b h^2}{6}$$

$$z_m = 0.85 \frac{(h E_f A_f + d E_s A_{s1})}{(E_f A_f + E_s A_{s1})}$$

en la segunda ecuación, el factor k tiene en cuenta, entre otros, el valor más alto de la resistencia a flexión $f_{ct,fl}$ cuando se compara con la resistencia a la tracción axial o con la resistencia a tracción de la superficie de hormigón. En este caso, k es igual a 2.0, según el Eurocódigo 2.

Paso 2: Determinación de las tensiones de tracción del refuerzo externo en cada grieta.

En concordancia con el apartado 4.3.2.1, el esfuerzo de tracción debe haberse calculado teniendo en cuenta la compatibilidad de deformaciones y equilibrio interno de fuerzas.

Paso 3: Determinación del incremento máximo posible del esfuerzo de tracción en el refuerzo externo:

Para verificar que el crecimiento de tensiones de tracción entre dos grietas consecutivas como se calcula en el diseño a flexión (apartado 4.3.2.1) no debe exceder el incremento máximo posible determinado por las tensiones de adherencia, debe estimarse el incremento que se puede alcanzar. Esto debe realizarse en las regiones donde suceden las grietas de flexión así como en la zona de anclaje.

La máxima fuerza de tracción que puede ser transferida del refuerzo externo al hormigón por medio de tensiones de adherencia en la zona de anclaje (Fig.4.12) se calcula de acuerdo con las ecuaciones siguientes:

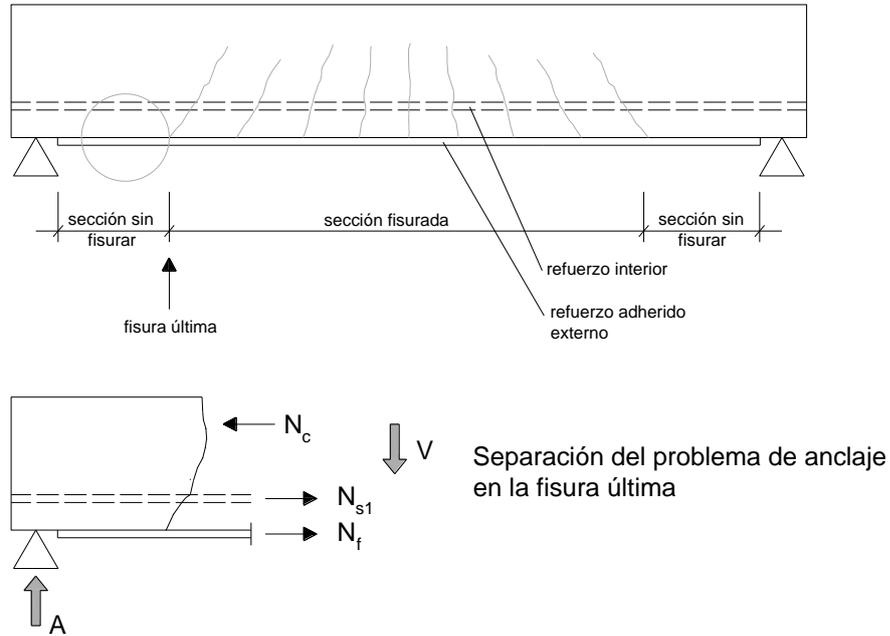


Figura 4.12 Anclaje final en zona sin fisurar del hormigón

$$\tau_{fad,max} = \frac{c_1}{\gamma_c} \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{t_f}} \quad [MPa]$$

donde c_1 es igual a 0'23. La máxima tensión posible es relacionada estrechamente con una longitud eficaz de anclaje $l_{b,max}$:

$$l_{b,max} = c_2 \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}} \quad [mm]$$

donde c_2 es igual a 1'44.

Un incremento en la longitud de anclaje por encima de $l_{b,max}$ no resulta en un incremento de la resistencia a tracción. Según varios investigadores, esto es debido a la limitación de la energía de rotura. Para longitudes de anclaje inferiores a $l_{b,max}$, la máxima tensión de tracción se describe:

$$\sigma_{fad} = \frac{l_b}{l_{b,max}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right) \sigma_{fad,max} \quad l_b \leq l_{b,max}$$

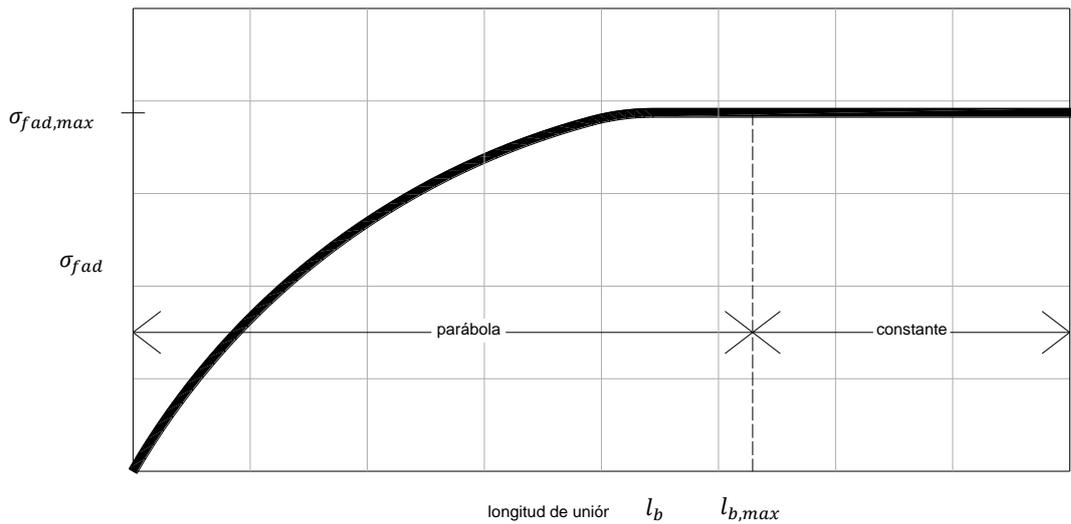


Figura 4.13 Esfuerzo de tracción relacionado con la longitud de anclaje

Un análisis del comportamiento del adhesivo basado en una relación bilinear simplificada entre tensión del adhesivo y deslizamiento conduce a las ecuaciones que pueden ser utilizadas para calcular el máximo incremento de tensión de tracción $\Delta\sigma_{fd}$ en un elemento situado entre dos grietas dependiendo de la tensión de tracción σ_{fd} . σ_{fd} es la tensión de tracción determinada en base a la compatibilidad de deformaciones y equilibrio de fuerzas en la sección donde actúan las tensiones de tracción más bajas.

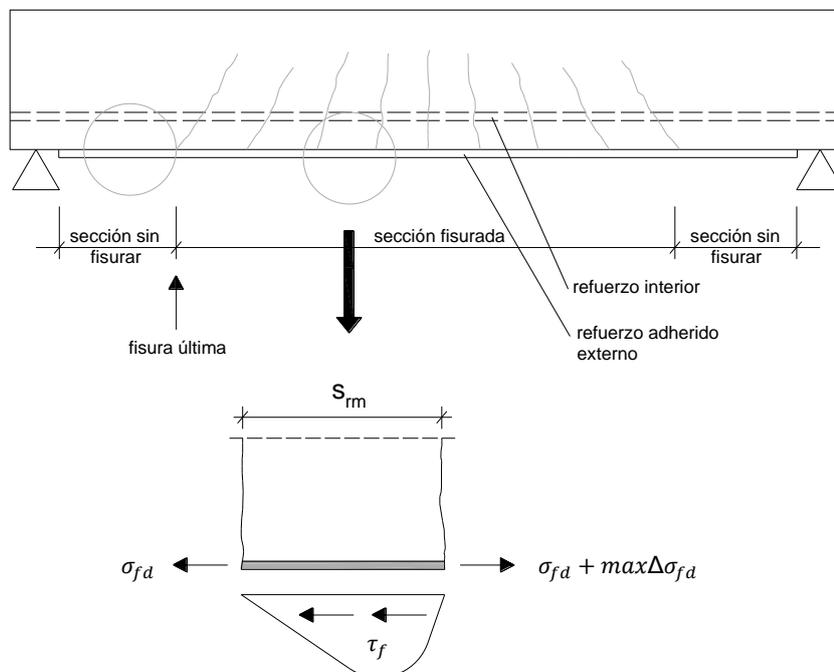


Figura 4.14 Elemento entre dos grietas consecutivas – análisis de desprendimiento en grietas de flexión

Se muestra en la siguiente figura el máximo incremento posible dependiendo de un específico espaciado de grietas:

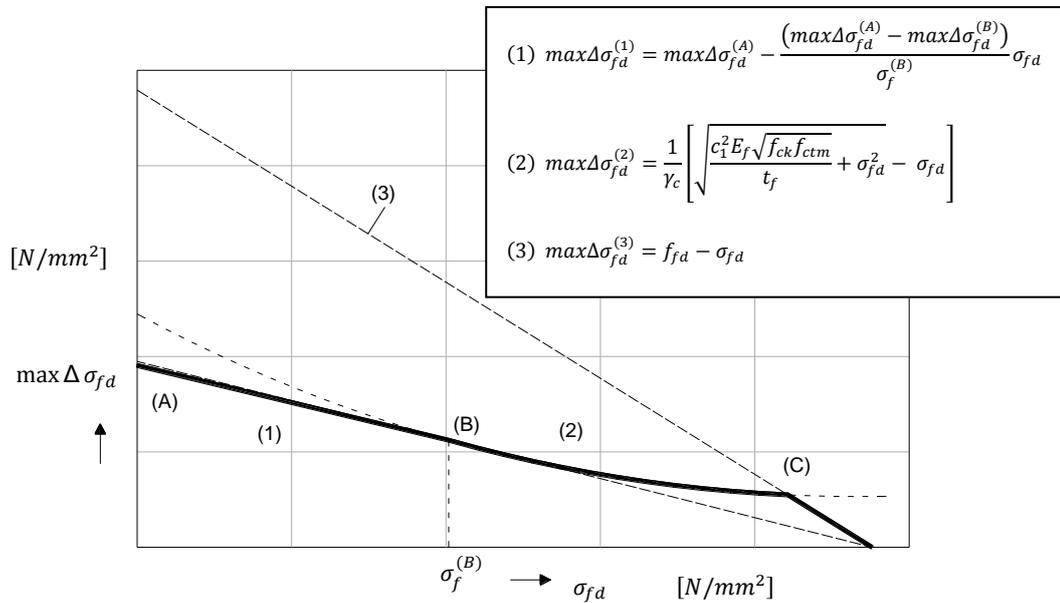


Figura 4.15 Diagrama del incremento máximo posible en esfuerzos de tracción entre dos grietas consecutivas

El punto A corresponde con la verificación al final del anclaje, donde $\sigma_{fd} = 0$. El máximo incremento de tensión (o en este caso, la tensión máxima a tracción del anclaje $\max \Delta\sigma_{fd}^{(A)}$) puede estimarse de las ecuaciones anteriores. Los puntos A, B y C mostrados en el diagrama deben estimarse con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_f^{(B)} = \frac{c_3 E_f}{s_{rm}} - c_4 \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \frac{s_{rm}}{4 t_f} \quad [MPa]$$

$$\max\Delta\sigma_{fd}^{(B)} = \frac{1}{\gamma_c} \left[\sqrt{\frac{c_1^2 E_f \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{t_f} + \left(\sigma_f^{(B)}\right)^2} - \sigma_f^{(B)} \right] \quad [MPa]$$

con $c_3 = 0'185$ y $c_4 = 0'285$. La disminución lineal entre los puntos A y B puede ser descrita por la ecuación siguiente:

$$\max\Delta\sigma_{fd}^{(1)} = \max\Delta\sigma_{fd}^{(A)} - \frac{(\max\Delta\sigma_{fd}^{(A)} - \max\Delta\sigma_{fd}^{(B)})}{\sigma_f^{(B)}} \sigma_{fd}$$

El gráfico entre B y C se determina por la ecuación:

$$\max \Delta \sigma_{fd}^{(2)} = \frac{1}{\gamma_c} \left[\sqrt{\frac{c_1^2 E_f \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{t_f} + \sigma_{fd}^2} - \sigma_{fd} \right] \quad [MPa]$$

Para valores altos de esfuerzos de tracción, el límite superior del aumento de tensiones se determina por la resistencia a tracción del FRP:

$$\max \Delta \sigma_{fd}^{(3)} = f_{fd} - \sigma_{fd}$$

Como nota, las unidades de las ecuaciones anteriores para tensiones y módulos de elasticidad son Mpa y mm para las dimensiones. Los factores propuestos c_1 , c_2 , c_3 , c_4 y k se obtienen de la calibración del modelo de unión por medio de ensayos de unión simplificados.

- Enfoque 3. Verificación al final del anclaje y de transferencia de fuerzas en la interfase hormigón-FRP:

Se deben seguir dos pasos. Primero, el anclaje final debe ser verificado en base al esfuerzo cortante, caso del enfoque 1. En el segundo, debe verificarse que el esfuerzo cortante a lo largo de la interfase, calculado en condiciones de equilibrio, se mantiene por debajo del valor crítico y, por lo tanto, se limita su valor. Considerando dos secciones a una distancia Δx , sujetas a momentos M_d y $M_d + \Delta M_d$, τ_b es igual a:

$$\tau_b = \frac{\Delta N_{fd}}{b_f \Delta x}$$

donde ΔN_{fd} es el cambio en la fuerza axial del FRP entre dos secciones. Esta ecuación puede simplificarse considerando que $M_{rd} = M_d / z_m$ y $N_{rd} = N_{fd} + N_{sd}$. Para la verificación del ELU, el cortante τ_b debe restringirse al cortante de unión de diseño, que es igual, en muchos casos, al cortante de unión del hormigón τ_{cbd} . En caso de adoptar el criterio de tensiones normales igual a cero, la resistencia de la unión es igual a 1'8 veces la resistencia a tracción aproximadamente, que corresponde a:

$$f_{cbd} = 1'8 \cdot \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$$

Dependiendo de si el acero ha alcanzado el límite elástico o no, N_{rd} y ΔN_{fd} pueden ser, aproximadamente:

$$\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd}: N_{rd} = N_{fd} \left(1 + \frac{A_{s1} E_s \varepsilon_s}{A_f E_f \varepsilon_f} \right) \approx N_{fd} \left(1 + \frac{A_{s1} E_s}{A_f E_f} \right) \quad \text{ó} \quad \Delta N_{fd} \approx \frac{\Delta M_d}{z_m \left(1 + \frac{A_{s1} E_s}{A_f E_f} \right)}$$

$$\varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd}: N_{rd} = N_{fd} + A_{s1} f_{yd} \quad \text{o} \quad \Delta N_{fd} = \frac{\Delta M_d}{z_m}$$

Con $\Delta M_d / \Delta x \approx V_d$ (fuerza cortante de diseño) y $z_m = (z_s + z_f) / 2 \approx 0.95d$, tenemos las siguientes condiciones:

$$\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd}: \frac{V_d}{0.95db_f \left(1 + \frac{A_{s1} E_s}{A_f E_f} \right)} \leq f_{cbd}$$

$$\varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd}: \frac{V_d}{0.95db_f} \leq f_{cbd}$$

La clave de este enfoque es que si la condición anterior se verifica, las grietas de flexión solo producirán microfisuración estable en la interfase hormigón-FRP y un despegue local, que no producirá fallo del adhesivo en la unión. De ahí que no debe aplicarse una limitación adicional en la deformación del FRP.

4.3.2.2.3 - Fallo a cortante en el final

Se han elaborado unas ecuaciones en base a un modelo de análisis de fallo a cortante al final del refuerzo FRP.

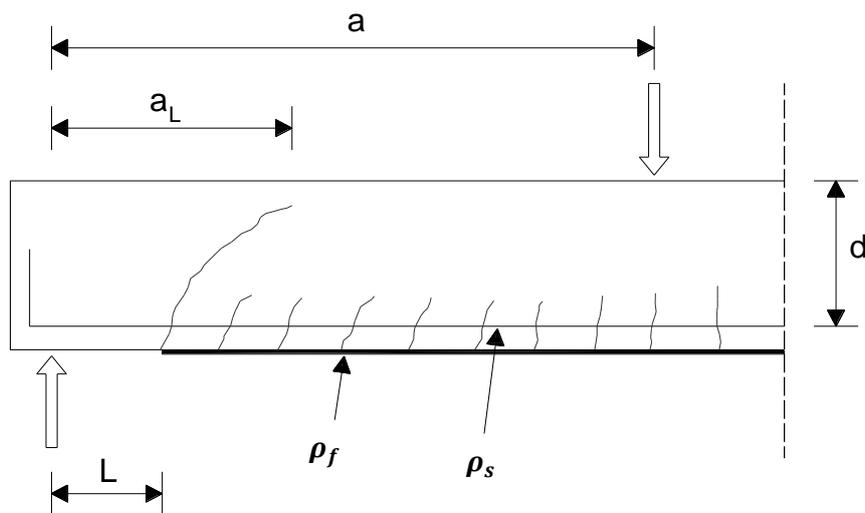


Figura 4.16 Modelo de análisis de fallo a cortante al final del refuerzo FRP

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd} b d$$

$$\tau_{Rd} = 0'15 \sqrt[3]{\frac{3d}{a_L} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \sqrt[3]{100 \rho_s f_{ck}}}$$

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \sqrt{\rho_s})^2}{\rho_s} d L^3}$$

$$a > L + d, \quad a_L < a$$

donde L (mm) es la distancia del final de FRP al apoyo, a (mm) es el tramo de cortante y $\rho_s = A_{s1}/bd$.

4.3.2.2.4 - Desprendimiento causado por irregularidades de la superficie del hormigón

El despegue del FRP debido a irregularidades en el sustrato de hormigón es un modo de fallo que no se ha estudiado con profundidad. Este fallo se puede evitar mediante la preparación previa de la superficie de hormigón con el procedimiento correcto adecuado a cada caso. Los detalles y especificaciones pueden ser proporcionados por los proveedores del sistema.

4.3.2.3 - Requerimientos de ductilidad

Generalmente la ductilidad de un elemento reforzado a flexión disminuye con respecto al elemento sin reforzar. Para garantizar la ductilidad adecuada de un elemento reforzado a flexión el acero debe tener suficiente límite elástico en el fallo, es decir, la deflexión o curvatura en estado último debe ser lo suficientemente grande. Con respecto a esta cuestión, el Eurocódigo 2 cita las siguientes limitaciones:

$$\xi \leq 0'45, \text{ para hormigones HA-35 o inferiores}$$

$$\xi \leq 0'35, \text{ para hormigones superiores a HA-35}$$

donde $\xi = x/d$, con x es la profundidad del área de compresión y d el canto útil.

En base a la ecuación anterior, con la deformación última del hormigón $\epsilon_{cu} = 0'0035$ y $h/d \approx 1'1$, se formula el siguiente requerimiento, en términos de mínima deformación del FRP en estado último:

$$\varepsilon_{fu,c} \geq 0'0050\varepsilon_o, \text{ para hormigones HA-35 o inferiores}$$

$$\varepsilon_{fu,c} \geq 0'0075\varepsilon_o, \text{ para hormigones superiores a HA-35}$$

Y en términos de una mínima deformación en el acero en estado último:

$$\varepsilon_{su,c} \geq 0'0043, \text{ para hormigones HA-35 o inferiores}$$

$$\varepsilon_{su,c} \geq 0'0065, \text{ para hormigones superiores a HA-35}$$

donde $\varepsilon_{su,c}$ es la deformación del acero en la sección crítica en estado último.

Aplicando estos criterios, si se cumplen las condiciones correspondientes a los estados límites de servicio, son necesarias cuantías de refuerzo muy elevadas, que si bien implican un coeficiente de seguridad de resistencia de la sección muy elevado, impiden el cumplimiento de las limitaciones anteriores. Por ello, las anteriores condiciones no serán de obligado cumplimiento si:

$$R(\text{capacidad resistente}) \geq 1'2 \cdot S(\text{carga actuante})$$

4.3.2.4 - Estado límite de servicio

4.3.2.4.1 - Base de cálculo

Los cálculos para verificar el estado límite de servicio se puede llevar a cabo según un análisis lineal elástico. Se hace referencia al estado no fisurado (1) o fisurado (2) del hormigón. Asumiendo este comportamiento lineal elástico y que el hormigón no soporta tensión, la sección fisurada puede basarse según Fig. 4.17.

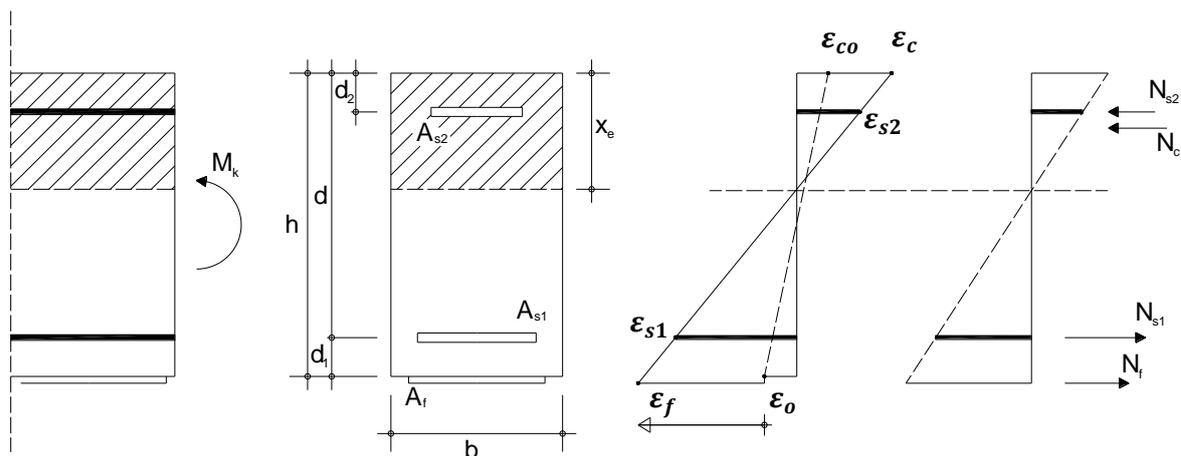


Figura 4.17 Análisis lineal elástico de una sección fisurada

Para el equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones, la profundidad del eje neutro se obtiene de las ecuaciones:

$$\frac{1}{2}bx_e^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_e) + \alpha_f A_f \left[h - \left(1 + \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_c} \right) x_e \right]$$

donde $\alpha_f = E_f/E_c$. Para valores bajos de la deformación inicial ε_o , el término $(1 + \varepsilon_o/\varepsilon_c)$ equivale 1. Para valores altos de ε_o , asumiendo la no contribución del acero a compresión y $h/d \approx 1$, el eje neutro debe resolverse con esta ecuación:

$$E_c \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2}bx_e \left(1.05d - \frac{x_e}{3} \right)}$$

El momento de inercia de la sección fisurada (2) viene dado por:

$$I_2 = \frac{bx_e^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_e)^2 + \alpha_f A_f (h - x_e)^2$$

Se procede de la misma forma en la sección no fisurada (1). El momento de inercia en este caso se calcula:

$$I_1 \approx \frac{bh^3}{12}$$

Y el momento de fisuración:

$$M_{cr} = f_{ctm} \frac{bh^2}{6}$$

4.3.2.4.2 - Limitación de tensiones

Para prevenir excesivo esfuerzo de compresión que genere grietas longitudinales y deformaciones irreversibles, se aplican las siguientes limitaciones para las tensiones de compresión en el hormigón (EC 2):

$$\sigma_c \leq 0'60f_{ck} \quad \text{bajo combinación de cargas poco frecuentes}$$

$$\sigma_c \leq 0'45f_{ck} \quad \text{bajo combinación de cargas casi permanentes}$$

Para prevenir el límite elástico del acero bajo cargas de servicio, el Eurocódigo 2 especifica:

$$\sigma_c = E_s \varepsilon_c \frac{d-x_e}{x_e} \leq 0'80f_{yk} \quad \text{bajo combinación de cargas poco frecuentes}$$

De la misma forma, la tensión del FRP bajo cargas de servicio debe ser limitada:

$$\sigma_f = E_f \left(\varepsilon_c \frac{h-x_e}{x_e} - \varepsilon_0 \right) \leq \eta f_{ck} \quad \text{bajo combinación de cargas casi permanentes}$$

siendo $\eta = 0.8$ para la fibra de carbono CFRP.

4.3.2.4.3 - Verificación de deflexiones

La rigidez es con frecuencia insuficiente para limitar las curvaturas y deflexiones de la viga reforzada bajo carga de servicio y puede necesitar ser incrementada para cumplir el ELS. En términos de métodos para la predicción de deflexiones, una precisión muy alta se obtiene de cálculos basados en una integración numérica de la curvatura. La deflexión a se calcula:

$$a = a_1(1 - \zeta_b) + a_2\zeta_b$$

donde a_1 y a_2 son las deflexiones en estado no fisurado y totalmente fisurado, respectivamente, y ζ_b es un coeficiente de distribución (tensión de refuerzo):

$$\zeta_b = 0 \quad M_k < M_{cr}$$

$$\zeta_b = 1 - \beta_1\beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^{n/2} \quad M_k > M_{cr}$$

donde β_1 es un coeficiente en función de las características de adhesivo del refuerzo y β_2 es un coeficiente en función del tipo de carga. Aunque el comportamiento del adhesivo difiere del comportamiento del acero, una buena concordancia se extrae de resultados analíticos y experimentales si tomamos los valores que aparecen en Eurocódigo 2, para $\beta_1 = 0.5$ y 1.0 , para acero liso y corrugado respectivamente; y $\beta_2 = 0.5$ y 1.0 , para cargas a larga duración y corta duración respectivamente.

La deflexión en estado sin fisurar, a_1 , y estado fisurada, a_2 , puede calcularse por el análisis elástico clásico, refiriéndose a la rigidez a flexión en estado sin fisuración $E_c I_1$ y completamente fisurado $E_c I_2$. Tomando el momento M_o en el que se aplica el FRP, esto produce:

$$a_1 = k_M l^2 \frac{M_k}{E_c I_1}$$

$$a_2 = k_M l^2 \left(\frac{M_o}{E_c I_{o2}} + \frac{M_k - M_o}{E_c I_2} \right) \quad M_k > M_o$$

donde k_M es un coeficiente en función del tipo de carga y I_{o2} es el momento de inercia en estado de fisuración antes del refuerzo.

4.3.2.4.4 - Verificación del ancho de fisura

Para proteger el acero y garantizar la funcionalidad del miembro se debe limitar el ancho de grieta. Asumiendo la estabilidad de las grietas, el valor característico del ancho se calcula en concordancia con el Eurocódigo 2:

$$W_k = \beta s_{rm} \varepsilon_{rm,r} = \beta s_{rm} \zeta \varepsilon_2$$

donde $\beta = 1.7$ es un coeficiente que relaciona el valor medio y característico del ancho de la grieta, s_{rm} es el espacio medio de agrietamiento, $\varepsilon_{rm,r}$ es la deformación media del acero con respecto al hormigón que lo recubre, ζ es un coeficiente de tensión de rigidez (similar al coeficiente del apartado anterior de deflexiones):

$$\zeta_b = 0 \quad M_k < M_{cr}$$

$$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^{n/2} \quad M_k > M_{cr}$$

y ε_2 es la deformación del refuerzo en estado completamente fisurado. Asumiendo $\varepsilon_2 = \varepsilon_{s1} = \varepsilon_f + \varepsilon_0$ y con $N_{rk} = N_{s1} + N_f$:

$$\varepsilon_2 = \frac{N_{rk} + E_f A_f \varepsilon_0}{E_s A_s + E_f A_f}$$

con $N_{rk} = M_k / z_e$ y z_e como el brazo de palanca entre la fuerza total a tracción ($N_{s1} + N_f$) y la compresión ($N_c + N_{s2}$).

Cálculo del espacio medio de agrietamiento:

$$s_{rm} = \frac{2 f_{ctm} A_{c,eff}}{\tau_{fm} u_f} \frac{\xi_b E_f A_f}{E_s A_s + \xi_b E_f A_f}$$

donde $A_{c,eff}$ es el área eficaz en tensión tomado del Eurocódigo 2 como el menor de $2.5(h-d)b$ y $(h-x)b/3$, $\tau_{fm} = 1.25 f_{ctm}$ y u_f es el perímetro de adhesivo del refuerzo FRP. ξ_b es un parámetro de unión dado por:

$$\xi_b = \frac{\tau_{fm} E_s d_s}{\tau_{sm} E_f 4 t_f}$$

donde d_s es el diámetro medio de las barras y t_f es el espesor del FRP.

Ignorando el efecto de la tensión de refuerzo ($\zeta=1$) y asumiendo $\varepsilon_0 \approx 0$, el ancho de fisuración derivado de las ecuaciones anteriores es:

$$W_k = 2.1 \rho_{c,eff} \frac{M_k}{E_s d \rho_{eq}} \frac{1}{(u_s + 0.694 u_f)}$$

donde $\rho_{c,eff} = A_{c,eff}/bd$ es la proporción del área eficaz en tensión y ρ_{eq} es la proporción equivalente de refuerzo. Especificando del Eurocódigo 2, $W_k \leq 0'3$ mm, se obtiene la siguiente condición para el ancho de adhesivo del FRP $u_f = b_f$ (b_f es el ancho total del FRP adherido):

$$u_f \geq 10'1 \rho_{c,eff} \frac{M_k}{E_s d \rho_{eq}} - 1'44 u_s$$

La ecuación expresa que debe proporcionarse un área suficiente de unión para cerrar las grietas de tal manera que el ancho de las grietas está limitado bajo cargas de servicio (para un valor constante de ρ_f y por lo tanto de ρ_{eq} , el ancho de las grietas será menor para el FRP con gran anchura y pequeño espesor)

4.3.2.5 - Análisis de los criterios FIB

FIB estudia los tipos de fallo mediante una división en dos grupos, el primero con acción completa del hormigón y refuerzo, y el segundo mediante la pérdida de esta acción. En el primer caso, los tipos de fallo corresponden a comportamiento de los materiales bajo las acciones trabajando de forma correcta todo el conjunto. En el segundo caso, el tipo de fallo viene del adhesivo referenciado a la pérdida del trabajo conjunto de todo el sistema por diferentes vías, como son el despegue del refuerzo o desprendimiento del recubrimiento. Destacar que se analiza con mucho detalle los modos de fallo que tienen por causa el desprendimiento, a través del comportamiento del adhesivo con elementos de hormigón en carga, en función de la fisuración y estado de la superficie de hormigón, y el caso concreto de varias investigaciones que muestran el fenómeno de fisuración a cortante en el extremo del refuerzo.

FIB analiza los estados límites últimos planteados para el caso de acción completa de los materiales, mediante cálculo de la profundidad del eje neutro en base a la compatibilidad de deformaciones y equilibrio de fuerzas interno, y el momento de diseño por equilibrio de momentos. El cálculo parte de la base de que debe considerarse una deformación inicial del hormigón existente.

En el caso de pérdida de acción compuesta, se establecen procedimientos para verificar el cumplimiento de los modos de fallo: desprendimientos, fisuras de cortante en el hormigón y al final del refuerzo, y fallo del adhesivo. También debemos cumplir con los requisitos de ductilidad impuestos.

Se estudia a continuación los estados límites de servicio mediante análisis lineal elástico, con referencia a ambos estados fisurado y no fisurado de la sección. En este caso, se establecen limitación de tensiones para el hormigón, acero y FRP y, por último, el cumplimiento de las verificaciones de deflexiones y anchos de fisuras.

Las referencias para el cálculo están basadas en las directrices del Eurocódigo 2, de donde se toman los coeficientes para las acciones y materiales.

El procedimiento de dimensionado de elementos de hormigón reforzados con FRP a flexión se puede resumir como:

- Para el miembro antes de reforzar: determinar el momento resistente de diseño ELU y comprobar el ELS. Este último no es necesario directamente pero proporcionará información valiosa con respecto al ELS del miembro reforzado (más probable para gobernar el diseño).
- Con el momento de servicio antes de reforzar, determinar la deformación inicial en la fibra extrema.
- Asumir acción compuesta total y con el momento de diseño después de reforzar determinar la sección requerida de FRP para cumplir el ELU. Verificar que se obtiene suficiente ductilidad.
- Calcular las tensiones en el hormigón, acero y FRP en ELS. Si las tensiones permitidas se superan, determinar la sección de FRP para cumplir con los requerimientos de limitación de tensiones.
- Verificar la resistencia a cortante de diseño del elemento reforzado. Si fuera necesario debe disponerse de un refuerzo a cortante.

4.3.3 - Comparativo de criterios ACI-FIB

Como resultado del análisis de ambas guías, podemos comprobar que los modos de fallo a controlar en el cálculo coinciden en ambas y donde se distinguen dos modos principales de fallo a flexión: aquellos con comportamiento monolítico de la sección, en los que la sección original y el material de refuerzo se comportan solidariamente hasta el agotamiento de la sección por flexión, o bien los modos de fallo que implican el despegue del material de refuerzo. No obstante, en la guía FIB el fallo del adhesivo se estudia de una forma más exhaustiva, con un análisis más detallado de cada una de las interfases entre el sustrato de hormigón existente y el refuerzo aplicado sobre él, así como en el caso del estado y comportamiento del hormigón bajo carga, anclaje y la posibilidad de aparición de fisuras a flexión y cortante en varios puntos de la viga. FIB también avisa de la posible aparición de fisuras a cortante en el hormigón en los extremos del refuerzo.

El procedimiento de cálculo del refuerzo es similar en ambas guías: análisis elástico y lineal de la sección y, a partir de una deformación inicial del elemento existente, comprobación en ELU mediante compatibilidad de deformaciones y equilibrio interno de fuerzas, y cumplimiento en ELS, con la comprobación también a cortante. En cambio, ACI sólo comprueba en ELS las tensiones en el acero y en el refuerzo (exclusivamente para cargas cíclicas), mientras FIB lo hace en acero, hormigón y refuerzo. FIB también exige la verificación de los requerimientos en relación al fallo del adhesivo, comentado en párrafo anterior. Como nota, destacar que en ELU, ACI parte de una profundidad supuesta del eje neutro que posteriormente el cálculo determinará su validez o no según equilibrio de fuerzas; y FIB nos proporciona una ecuación de cálculo para estimar también inicialmente esta profundidad del eje neutro, en base a un proceso de iteración con valores de la deformación del acero a compresión y del refuerzo.

En ambas guías existe un apartado para los requerimientos de ductilidad, debido a su disminución en el elemento reforzado. El enfoque de este fenómeno es diferente, y por lo tanto el cálculo también. ACI expone la necesidad de una reserva de resistencia para cumplir con la ductilidad y FIB que, para su garantía, el acero debe tener suficiente límite elástico en el fallo.

Como nota final, reseñar que ambas guías parten de directrices diferentes, ACI de otro apartado del comité (ACI 318) y FIB del Eurocódigo 2. Este hecho genera que los coeficientes aplicables a las cargas y materiales sean diferentes en cada caso, así como la nomenclatura y denominación diferentes. Valga como ejemplo que en el caso de ACI, la deformación máxima del hormigón es igual a 3‰ y en FIB, se establece en 3,5‰.

CUADRO COMPARATIVO ACI 440 / FIB, REFUERZOS A FLEXIÓN DE VIGAS		
Requerimientos	ACI 440	FIB
Comprobación previa al refuerzo	Resistente: $(\phi R_n)_{existente} \geq (1.2S_{DL} + 0.85S_{LL})_{nueva}$ Al Fuego: $(R_n\phi)_{existente} \geq S_{DL} + S_{LL}$	-----
Procedimiento de Cálculo	<p style="text-align: center;">Determinar el estado existente de deformación del sustrato Refuerzo en la cara traccionada de la viga Comportamiento elástico lineal del CFRP</p> <p style="text-align: center;">Comprobación en ELU</p> <p style="text-align: center;">← Profundidad supuesta del eje neutro Ecuación para el cálculo del eje neutro →</p> <p style="text-align: center;">Cumplimiento en ELS</p> <p style="text-align: center;">← Tensiones en acero y CFRP (sólo cargas cíclicas) Tensiones en acero, hormigón y CFRP →</p>	
Modos de Fallo	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamiento correcto hormigón-CFRP: - Alcance del límite elástico del acero en tensión seguido por el aplastamiento del hormigón - Alcance del límite elástico del acero en tensión seguido por la rotura de la lámina CFRP - Aplastamiento del hormigón a compresión antes de alcanzar el límite elástico del acero - Fallo del adhesivo: - Delaminación por cortante o flexión del recubrimiento de hormigón - Despegue del CFRP del sustrato de hormigón 	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamiento correcto hormigón-CFRP: - Alcance del límite elástico del acero en tensión seguido del aplastamiento del hormigón - Alcance del límite elástico del acero en tensión seguido de la rotura de la lámina CFRP - Aplastamiento del hormigón - Fallo del adhesivo: - Despegue en el hormigón cerca de la superficie - Despegue en el adhesivo - Despegue en las 109nterfaces hormigón y adhesivo - Despegue en el interior del CFRP - Fallo a cortante al final del CFRP

Requerimientos	ACI 440	FIB
Minoración Resistencia CFRP	$C_E = 0.95$, ambiente interior $C_E = 0.85$, ambiente exterior o agresivo $\psi_f = 0.85$, Coeficiente reductor adicional de resistencia a flexión	$\gamma_f = 1.20$, laminado, o tejido con alto C.Calidad $\gamma_f = 1.35$, tejido con nivel medio de C.Calidad
Cumplimiento de Ductilidad	Reserva de resistencia	Garantizar suficiente límite elástico del acero
Verificaciones	- A cortante	- A cortante - Fallo del adhesivo debido a fisuras de cortante - Fallo del adhesivo al final del anclaje y a lo largo del refuerzo - Deflexiones - Ancho de grieta - Situación accidental
Deformación Máxima del Hormigón	0.003	0.0035
Coeficientes	ACI 318 ACI 216R	EC2

4.4 - CRITERIOS PARA REFUERZO A CORTANTE DE VIGAS

4.4.1 - ACI 440

4.4.1.1 - Consideraciones generales

Los sistemas FRP han demostrado el incremento de la resistencia a esfuerzos cortantes de vigas de hormigón existentes mediante encamisado total o parcial; orientar las fibras transversales al eje del miembro o perpendicular a las grietas potenciales de cortante es eficaz en el suministro adicional de fuerza cortante.

En el refuerzo externo en forma de laminados, la separación a eje entre cintas no debe exceder de la suma de $d/4$ más la anchura de la cinta.

4.4.1.2 - Esquemas de revestimiento

Los tres tipos de revestimientos FRP utilizados para incrementar la resistencia a cortante de vigas se muestran en la Fig. 4.18.

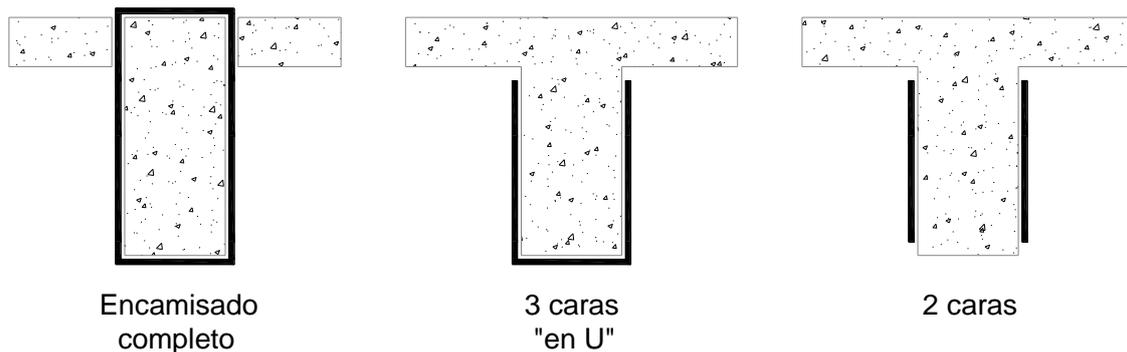


Tabla 4.18 Esquemas típicos de envoltura para refuerzo a cortante aplicando laminados FRP

El encamisado completo es el esquema más efectivo y el más aplicado en columnas, dado que es fácil acceder a sus cuatro caras. En aplicaciones en vigas, donde el forjado impide la envoltura completa, se puede realizar con la envoltura alrededor de tres caras, en forma de U, o el pegado en los dos laterales del miembro.

Las tres técnicas han demostrado mejorar la resistencia a corte, por orden, el sistema más eficiente es el encamisado completo de la sección, seguido del encamisado en U. El pegado en los laterales es el esquema menos eficiente.

4.4.1.3 - Resistencia nominal a cortante

La resistencia nominal a cortante de un miembro de hormigón reforzado con CFRP debe exceder la resistencia a cortante requerida. Esta resistencia a corte requerida se calcula con los coeficientes de carga reflejados en ACI 318, así como el factor reductor de resistencia a corte ϕ .

$$\phi V_n \geq V_n$$

La resistencia nominal a cortante de un elemento de hormigón reforzado con CFRP puede determinarse añadiendo las contribuciones del refuerzo a las propias del acero (estribos,...) y del hormigón. Un factor reductor adicional se aplica en la contribución del sistema FRP, según tabla 4.19.

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f)$$

$\psi_f=0.95$	Vigas con encamisado completo
$\psi_f=0.85$	Envoltura en forma de U o en caras laterales

Tabla 4.19 Factor adicional de reducción recomendado para refuerzo a cortante

4.4.1.4 - Contribución del sistema CFRP a cortante

La Fig.4.20 ilustra las variables dimensionales utilizadas en los cálculos a cortante de laminados FRP.

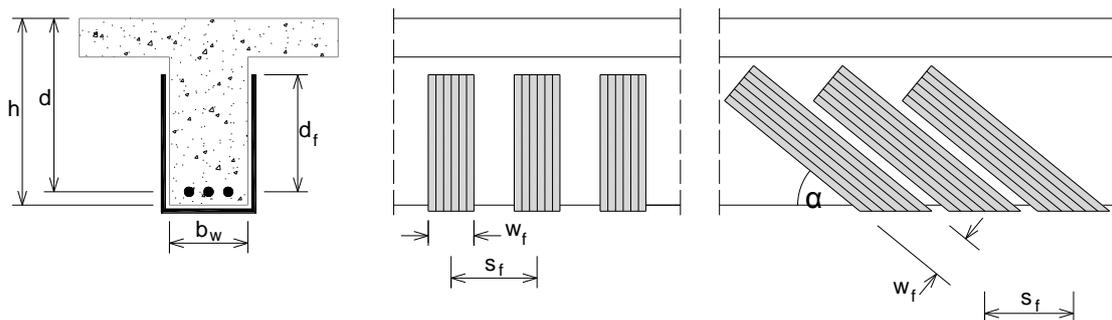


Tabla 4.20 Ilustración de las variables dimensionales utilizadas en el cálculo de refuerzo a cortante para reparación, restauración o refuerzo utilizando laminados FRP.

La contribución del sistema FRP a cortante se basa en la orientación de las fibras y un patrón asumido de grieta. El cortante proporcionado por el refuerzo FRP

puede determinarse con el cálculo de la fuerza resultante de la tracción en el refuerzo a través de la grieta supuesta. Se muestra la ecuación:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d_f}{s_f}$$

donde:

$$A_{fv} = 2nt_f w_f$$

El esfuerzo a tracción en el refuerzo FRP a cortante en estado último es directamente proporcional al nivel de deformación que puede desarrollarse en el refuerzo CFRP a cortante en estado último.

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f$$

4.4.1.4.1 - Deformación efectiva en laminados CFRP

La deformación efectiva es la máxima que puede alcanzarse en un sistema FRP en el último estado de carga y está gobernada por el modo de fallo del sistema FRP y del miembro reforzado de hormigón. El técnico debe considerar todos los posibles modos de fallo y utilizar una deformación efectiva representativa del modo de fallo crítico. Los siguientes subapartados orientan en la determinación de la deformación efectiva para diferentes configuraciones de laminados FRP utilizados para el refuerzo a corte de elementos de hormigón.

- Miembros encamisados completamente

Se limita la deformación máxima de diseño del refuerzo FRP al 0'4%:

$$\varepsilon_{fe} = 0'004 \leq 0'75\varepsilon_{fu}$$

Esta limitación está basada en ensayos y experiencia. Deformaciones mayores no deben ser utilizadas para aplicaciones de refuerzo mediante FRP.

- Pegado en U o en caras laterales

Las tensiones del adhesivo deben analizarse para determinar la utilidad de estos sistemas y el nivel de deformación efectiva que puede alcanzarse. Esta deformación efectiva se calcula aplicando un coeficiente reductor de unión k_v en el cortante:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0'004$$

El coeficiente reductor de unión es una función de la resistencia del hormigón, el esquema de envoltura utilizado y la rigidez del laminado. Puede ser calculado por las siguientes ecuaciones:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11.900 \varepsilon_{fu}} \leq 0'75$$

La longitud activa de unión L_e es la longitud sobre la que la mayoría de la tensión de pegado se mantiene. Esta longitud la da la ecuación:

$$L_e = \frac{23.300}{(n t_f E_f)^{0'58}}$$

El coeficiente reductor de unión también se basa en dos factores de modificación, k_1 y k_2 , en función de la resistencia del hormigón y el esquema de envoltura aplicado, respectivamente. Las expresiones para estos factores son:

$$k_1 = \left(\frac{f_c}{27} \right)^{2/3}$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f} & \text{para refuerzos en U} \\ \frac{d_f - 2L_e}{d_f} & \text{para refuerzo en los dos laterales} \end{cases}$$

Pueden utilizarse anclajes mecánicos en los puntos de terminación para desarrollar grandes fuerzas de tracción. La eficacia de estos anclajes mecánicos, junto con el nivel de esfuerzos de tracción que pueden desarrollar, debe tener base a través de representativos ensayos físicos. En ningún caso, sin embargo, la deformación efectiva del laminado FRP debe exceder de 0'004.

4.4.1.4.2 - Espaciado

Cintas o laminados de FRP separados utilizados para refuerzos a cortante deben ser investigados para evaluar su contribución a la resistencia a cortante. El espaciado debe adherirse a los límites establecidos por ACI 318 para la armadura a cortante (estribos). Ensayos estructurales deben validar el uso de discretos estribos separados de FRP.

4.4.1.4.3 - Límites de refuerzo

El refuerzo total a cortante debe tomarse como la suma de la contribución del refuerzo a cortante FRP y la armadura a cortante. La capacidad de refuerzo se limita en base a los criterios de las vigas armadas, según ACI, Sección 11.5.6.9. Este límite se indica en la siguiente ecuación:

$$V_s + V_f \leq 0.66 \sqrt{f'_c} b_w d$$

4.4.2 - Bulletin 14 FIB

4.4.2.1 - Introducción

El refuerzo a cortante del hormigón armado mediante sistema FRP puede realizarse siempre y cuando el pegado del refuerzo externo se haga con la dirección principal de la fibra lo más paralela posible a las tensiones máximas principales, para que la efectividad del refuerzo sea la máxima.

Para la mayoría de casos comunes de miembros sujetos a cargas laterales, o sea las cargas perpendiculares al eje del elemento (vigas bajo cargas gravitatorias), las trayectorias de la tensión principal máxima en los puntos de cortante crítico forman un ángulo con el eje del elemento que debe ser tomado aproximadamente igual a 45°. No obstante, es normalmente más práctico sujetar el refuerzo externo CFRP con la dirección principal de la fibra perpendicular al eje del miembro. Ver figura 4.21.

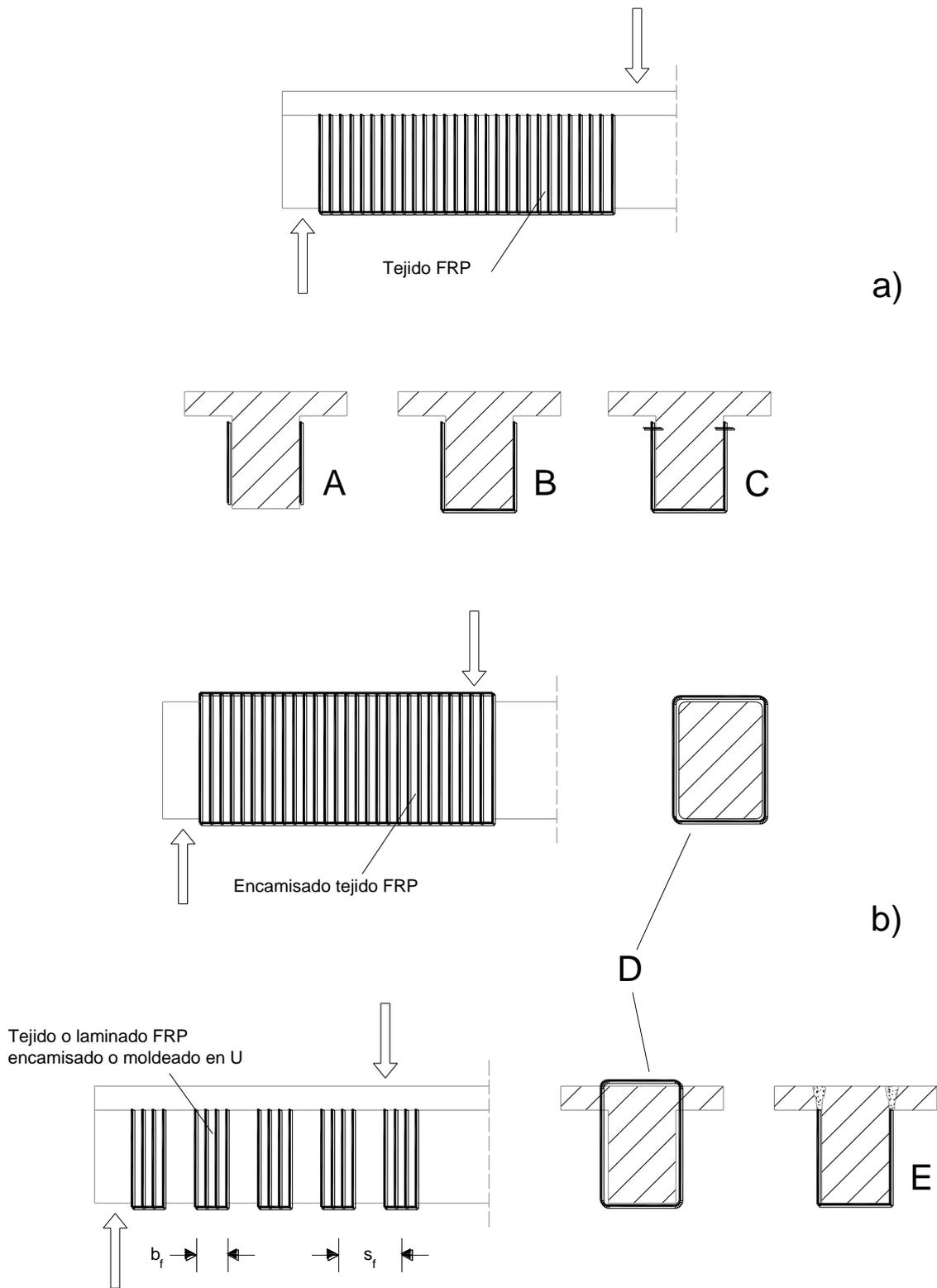


Figura 4.21 Ilustración de viga de hormigón reforzada a cortante con FRP; a) tejido FRP adherido al alma, b) tejido FRP encamisado o en forma de U

Detalladas investigaciones en el refuerzo a cortante de elementos de hormigón armado han sido relativamente limitadas y, en cierto grado, controvertidas. Con un par de excepciones, muchos investigadores han idealizado los materiales FRP en analogía con los estribos de acero internos, suponiendo que la capacidad del FRP al esfuerzo cortante proviene de la capacidad de las fibras de cargar tensiones a mayor o menor deformación constante, que es igual o a la deformación última del refuerzo ϵ_{fu} o a un valor reducido. Estudios han demostrado que cuando el hormigón alcanza su capacidad a cortante (que es justo antes de su fallo a cortante), el refuerzo externo es estirado en la dirección principal de la fibra hasta un nivel de deformación que es, en general, menor que la deformación de tensión de rotura. Esta deformación se define como deformación efectiva $\epsilon_{f,e}$ por reflejar el hecho de que si fuera multiplicada por el módulo elástico del refuerzo FRP en la dirección principal de la fibra, E_f , y en el área disponible de la sección del refuerzo, la carga de la fuerza total puede ser proporcionada por el refuerzo en el fallo a cortante del elemento.

La deformación efectiva es extremadamente difícil, sino imposible, de calcular en base a un riguroso análisis. Pero puede estimarse en base a una modelación simple y a través de un detallado análisis de datos experimentales. Lo principal de la estimación de la deformación efectiva es la identificación del estado del material de refuerzo en el fallo a corte del miembro de hormigón. Hay que fijarse que el fallo está siempre definido por esfuerzo diagonal del hormigón.

Puede discutirse que en el estado límite último siempre se espera cierto grado de despegue del refuerzo FRP en la interfase hormigón-refuerzo, incluso si el fallo último no ocurre simultáneamente con el desprendimiento. Esto se atribuye a la excesiva deformación del FRP, que resulta en incompatibilidades de deformación con el sustrato de hormigón y el consecuente agrietamiento. Las grietas, de una en una, provocan concentraciones de tensión que producen el despegue local. De ahí, se puede discutir que la deformación efectiva $\epsilon_{f,e}$ depende mucho de la longitud del refuerzo adherido, su relación con la longitud eficaz de adhesivo (a través de la que se desarrollan tensiones a cortante del adhesivo en la interfase CFRP-hormigón) y la relación de este último con la longitud de desarrollo (definida como la necesaria para alcanzar la rotura por tensión del refuerzo antes que el desprendimiento). Aparte de las condiciones del adhesivo (preparación de la base, ejecución,...), la longitud de desarrollo depende de la rigidez axial del refuerzo, que puede ser expresado por el producto $E_f \cdot \rho_f$ y es inversamente proporcional a la resistencia a cortante, del hormigón.

4.4.2.2 - Diseño del modelo ELU

4.4.2.2.1 - Miembros de sección rectangular, en T y en I

El refuerzo exterior FRP puede ser tratado por analogía con el acero interior (aceptando que el FRP sólo carga tensiones normales en la dirección principal del material) suponiendo que en el estado límite último a cortante (tensión diagonal del hormigón) el FRP desarrolla una deformación efectiva en la dirección principal del material (nota: esta no es la deformación principal por tensión, que puede suponerse perpendicular a la grieta). La deformación efectiva $\epsilon_{f,e}$ es, en general, menor que la

deformación de fallo por tensión ε_{fu} . De ahí que la capacidad a cortante de un elemento reforzado puede ser calculada de esta forma de acuerdo con el Eurocódigo 2:

$$V_{Rd} = \min(\{V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}\}; V_{Rd2})$$

donde:

V_{cd} : contribución a cortante de diseño del hormigón

V_{wd} : contribución del acero a cortante de diseño

V_{fd} : contribución a cortante del laminado

V_{Rd2} : fuerza cortante de diseño que puede ser soportada por el hormigón sin agotarse

La contribución del FRP a cortante, V_{fd} , puede escribirse de la siguiente forma (ver Fig.4.22):

$$V_{fd} = 0.9\varepsilon_{fd,e}E_{fu}\rho_f b_w d(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\alpha$$

donde:

$\varepsilon_{fd,e}$: valor de cálculo de la deformación efectiva del CFRP

b_w : ancho mínimo de la sección por encima del canto útil

d : canto útil de la sección

ρ_f : ratio de refuerzo CFRP igual a $2t_f \sin\alpha / b_w$ para refuerzo continuo adherido a cortante de espesor t_f ó $(2t_f / b_w)(b_f / s_f)$ para refuerzos CFRP en forma de laminado o tejido de ancho b_f separados s_f

E_{fu} : módulo de elasticidad del CFRP en la dirección principal

θ : ángulo de la grieta diagonal con respecto al eje del miembro, supuesto de 45°

α : ángulo de la orientación principal de la fibra y el eje longitudinal del miembro

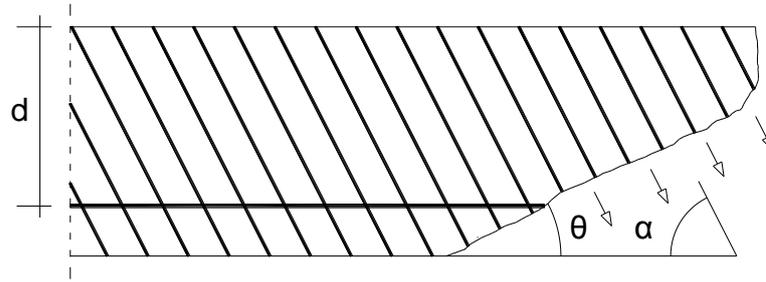


Figura 4.22 Contribución del CFRP a la capacidad de cortante

Dada la carencia de datos suficientes, $\epsilon_{fk,e}$ puede ser aproximado mediante la multiplicación del valor medio de la deformación efectiva del refuerzo $\epsilon_{f,e}$ con un coeficiente de reducción llamado k .

$$\epsilon_{fk,e} = k\epsilon_{f,e} \quad k = 0'8$$

Algunos investigadores han propuesto que la deformación efectiva debe ser limitada a un valor máximo, alrededor de 0'006, para mantener la integridad del hormigón y la activación segura del mecanismo de unión total.

Una síntesis y evaluación de todos los resultados experimentales publicados con respecto al refuerzo a cortante con sistemas FRP hasta principios de 1997 tienen como resultado las expresiones de mejor ajuste dadas a continuación:

- Encamisado completo de CFRP (Fig 4.21 b)

$$\epsilon_{f,e} = \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu}\rho_f} \right)^{0'30} \epsilon_{fu}$$

- Camisa lateral o en forma de U de FRP (Fig 4.21 a)

$$\epsilon_{f,e} = \min \left[0'65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu}\rho_f} \right)^{0'56} \times 10^{-3}, \quad 0'17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu}\rho_f} \right)^{0'30} \right]$$

Desprendimiento

Rotura

En todas las ecuaciones, f_{cm} en MPA y E_{fu} en GPa.

4.4.2.2.2 - Recomendaciones de diseño

De un análisis detallado de las ecuaciones anteriores, las obtenemos trazadas en la Fig. 4.23:

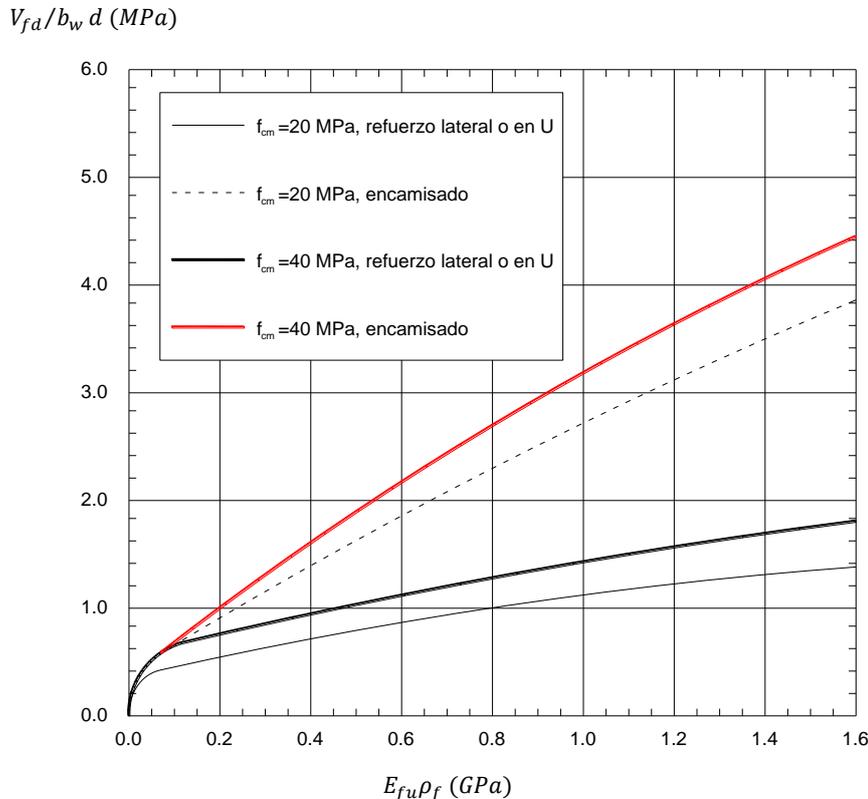


Figura 4.23 Contribución del CFRP a la capacidad de cortante de dos hormigones de diferente resistencia y encamisado completo contra configuraciones sin envoltura completa

Y conduce a la conclusión de que:

- si el fallo está gobernado por el desprendimiento combinado con rotura a cortante (por ejemplo en refuerzo lateral o en forma de U), el aumento de la capacidad a cortante con $E_{fu}\rho_f$ es relativamente pequeño pero la resistencia del hormigón juega un importante papel.
- si el fallo está gobernado por la rotura a cortante combinado con o seguido de la rotura del FRP (por ejemplo en encamisado completo) el aumento de la capacidad a cortante con $E_{fu}\rho_f$ se vuelve bastante sustancial, pero el papel del hormigón es de importancia secundaria. Es evidente que el encamisado completo es de lejos más efectivo que el revestimiento parcial. Cuando el encamisado completo no es factible (en caso de no tener acceso a la cara superior de la viga), se recomienda que se adjunten laminados de FRP en la zona de compresión.

Como recomendación adicional para un correcto diseño de refuerzo a cortante de elementos de hormigón con FRP debemos señalar que el espacio s_f entre cintas, si se aplican en vertical, no debe exceder de $(0.9d - b_f/2)$ para secciones rectangulares

o $(d - h_f - b_f/2)$ para vigas en T (con el espesor del forjado igual a h_f), de modo que no puedan formarse grietas diagonales sin interceptar una cinta FRP.

4.4.2.2.3 - Consideraciones de longitud del CFRP adherido

Uno de los inconvenientes del enfoque más cualitativo descrito anteriormente es que la longitud del FRP no es explícitamente tenida en cuenta. Esto se justifica debido a que para las estructuras a tamaño real, la longitud eficaz de unión es normalmente una pequeña parte de la profundidad del elemento de hormigón, y de ahí el parcialmente ineficaz FRP comprende una pequeña parte del total.

4.4.2.3 - Estado límite de servicio

El refuerzo adherido externamente no debe despegarse en estado límite de servicio. Esto es importante, de forma que los problemas relacionados con la penetración de humedad, propagación de fisuras,...deben evitarse. Para verificar esto, la deformación del FRP en estado límite de servicio $\epsilon_{fk,e}$ debe limitarse a $0,8f_{yk}/E_s$, salvo disposición contraria y verificada por el proveedor del sistema FRP.

4.4.3 - Comparativo de criterios ACI-FIB

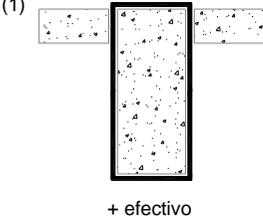
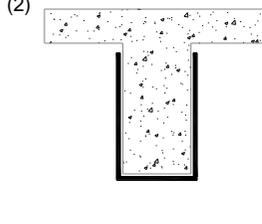
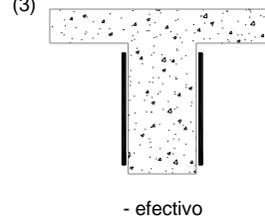
Ambas guías nos presentan la misma tipología de esquemas de refuerzo de vigas de hormigón armado mediante sistema FRP: encamisado o envoltura completa, pegado a tres caras en forma de U y pegado en las dos caras laterales. Coinciden en señalar que el refuerzo más efectivo corresponde al revestimiento completo con FRP y el menos efectivo, el pegado en dos caras. Este hecho condiciona a la formulación aplicable en cada caso en ambas guías; ACI aplica un coeficiente reductor diferente para cada esquema en el cálculo de la resistencia a corte del refuerzo y tanto ACI como FIB establecen también diferente formulación para el cálculo de la deformación eficaz en cada caso.

Tanto en FIB como en ACI se plantea la resistencia a cortante mediante la contribución del acero, el hormigón y el refuerzo FRP; en el caso del FRP, la deformación eficaz del mismo se toma como base para el cálculo y de forma diferente en función del tipo de esquema de refuerzo en estudio. La contribución es distinta según el tipo de disposición. En este sentido, el mayor refuerzo se obtiene con una disposición que envuelva por completo el elemento mientras que el mínimo con una disposición a doble cara. La contribución a cortante del FRP tiene en ACI un coeficiente reductor de 0,95 para encamisado completo y 0,85 para los revestimientos parciales a dos o tres caras, en FIB siempre es 0,90.

Destacar que, como en el apartado anterior de refuerzo a flexión, cada guía parte de una directriz diferente para determinar los coeficientes en la formulación, ACI de su apartado ACI 318 y FIB, del Eurocódigo 2. En ambas guías se establece una limitación diferente de la deformación de diseño del FRP siendo en ACI de 0,04% y en el caso de FIB, de 0,06%.

En lo que respecta a la técnica de refuerzo mediante laminados separados, en forma de estribos externos, se establece en cada guía un espacio máximo entre ejes de laminado que se debe cumplir (FIB incluso establece un criterio diferente para vigas de sección rectangular y vigas en T). La formulación propuesta por FIB es más restrictiva que ACI, con una separación inferior entre laminados de forma que limita que toda grieta sea siempre interceptada por un laminado. A pesar de que las investigaciones han determinado la colocación correcta del refuerzo con la fibra en dirección perpendicular al eje de la viga (más práctica también en la ejecución), ACI abre la posibilidad de colocar los laminados perpendiculares a la grieta, de forma que el refuerzo trabaje en su mayor rendimiento en la misma dirección donde mayores son las tensiones de tracción.

Por último, ACI establece una limitación de refuerzo, para el trabajo de acero y FRP. FIB limita la deformación eficaz del FRP en estado límite de servicio.

CUADRO COMPARATIVO ACI 440 / FIB, REFUERZOS A CORTANTE DE VIGAS		
	ACI 440	FIB
Esquemas de Refuerzo	<p>(1)  + efectivo</p> <p>(2)  + efectivo</p> <p>(3)  - efectivo</p>	
Resistencia a Cortante	$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f)$ $\psi_f, \text{Tipo 1: } 0,95$ $\psi_f, \text{Tipos 2 y 3: } 0,85$	$V_{Rd} = \min(\{V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}\}; V_{Rd2})$
Contribución del Refuerzo CFRP	$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d_f}{s_f}$	$V_{fd} = 0.9 \varepsilon_{fd,e} E_{fu} \rho_f b_w d (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha$
Límite de Deformación de Diseño	$\varepsilon_{fe} \leq 0.004$	$\varepsilon_{fe} \leq 0.006$
Separación entre Laminados	<p>En todo caso:</p> $s_f \leq d/4 + w_f$	<p>Sección rectangular: $s_f \leq 0.9 - b_f/2$</p> <p>Sección en T: $s_f \leq d - h_f - b_f/2$</p>
Límites	<p>De refuerzo:</p> $V_s + V_f \leq 0.66 \sqrt{f'_c} b_w d$	<p>De deformación del CFRP en ELS:</p> $\varepsilon_{fk,e} = 0.8 f_{yk} / E_s$
Coeficientes	ACI 318	EC2

CAPÍTULO 5

CONSIDERACIONES ESPECIALES DE DISEÑO Y EFECTOS DEL ENTORNO

5.1 - INTRODUCCIÓN

Si la aplicación es correcta, los sistemas de refuerzo mediante CFRP parecen ofrecer las mismas o mejores estimaciones durante el ciclo de vida comparado con otros sistemas de refuerzo. Aunque la durabilidad del FRP y del hormigón son bien conocidas, el sistema combinado está aumentando la inquietud de garantizar el comportamiento global a largo plazo.

La interfase de CFRP y hormigón es el componente crítico para la eficacia de la mayoría de las aplicaciones de refuerzo estructural FRP dado que es el punto donde se dan la transferencia de tensiones. La experiencia ha demostrado que el adhesivo entre el FRP y el hormigón no puede siempre asegurarse. La calidad del adhesivo está influenciada por las condiciones del hormigón existente, la preparación de la superficie del sustrato de hormigón, la calidad en la aplicación del FRP, la calidad del sistema FRP por sí mismo y la durabilidad de la resina. Finalmente, la durabilidad del refuerzo mediante FRP y la elección del sistema correcto se ha de realizar en función de las condiciones ambientales donde está ubicado, el rango de temperaturas y humedad, y una serie de factores que pueden modificar las propiedades físicas y mecánicas del refuerzo. Vamos a analizar en este apartado el comportamiento de los materiales compuestos ante estos agentes.

5.2 - RESISTENCIA MÍNIMA DEL SUSTRATO DE HORMIGÓN

El agotamiento del hormigón, deterioro y la corrosión de las armaduras existentes deben ser evaluados y reparados antes de la aplicación del sistema FRP. El deterioro del hormigón armado en cuestión incluye las reacciones alcalo-silíceas, carbonatación y grietas longitudinales alrededor de barras de acero corroídas.

El estado y la resistencia del sustrato deben ser evaluados para determinar su capacidad de resistencia del elemento con la adhesión del refuerzo externo de FRP.

La resistencia del sustrato existente de hormigón armado es un parámetro importante para las aplicaciones de adherencia, incluyendo la resistencia a flexión y a cortante. Debe poseer la resistencia necesaria para desarrollar el diseño de tensiones del sistema FRP a través de la adherencia. El sustrato, incluyendo todas las superficies adheridas entre las áreas reparadas y hormigón original, debe tener suficiente resistencia a tracción y cortante para transferir el esfuerzo al sistema FRP. La resistencia a tracción debe ser como mínimo de 1,4 MPa determinada mediante ensayo de adhesión-arrancado. Los sistemas de refuerzo FRP no deben utilizarse cuando el hormigón existente tiene una resistencia a compresión menor de 17 MPa. Este valor no contempla casos de refuerzo por confinamiento, como los encamisados de pilares, que dependen únicamente de un profundo contacto entre el hormigón y el sistema de refuerzo FRP. El diseño de la tensión en los sistemas FRP se desarrolla en base a la deformación o dilatación de la sección de hormigón en aplicaciones críticas de contacto.

La aplicación de los sistemas FRP no detendrá la corrosión en curso de las armaduras de acero. Si la corrosión del acero es evidente o está degradando el sustrato de hormigón, la colocación de los sistemas de refuerzo mediante FRP no es

recomendable sin frenar previamente la corrosión y reparar cualquier degradación en el sustrato.

5.3 - TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA

La temperatura de transición vítrea T_g es la temperatura por encima de la cual el rendimiento del FRP puede esperarse que caiga dramáticamente y corresponde al valor medio del registro de temperaturas sobre la que la resina cambia de un estado de dureza frágil a un estado plástico más suave. La T_g es única para cada sistema de refuerzo y varía entre 60 y 82°C. La energía térmica proveniente por encima de T_g produce cambios en la resina epoxi que tiende a moverse y volverse más flexible. Esto producirá una reducción de su capacidad de adhesivo. También desciende la capacidad de carga de la resina y termina como carga preferente sobre las fibras individuales (las más cortas). Desde el momento en que la carga no es compartida entre el grupo de fibras, la carga en las fibras individuales puede exceder de la capacidad de la fibra y romper. Las siguientes fibras más cortas recogen la carga y si el nivel de tensión es demasiado alto, romperán y así sucesivamente. La capacidad de carga última de un FRP puede ser reducida entorno al 30-40% en muchos casos.

Para evitar despegues prematuros a causa de un incremento excesivo de temperatura, la temperatura máxima de servicio debe ser inferior a la temperatura de transición vítrea de la resina y del adhesivo. Sin embargo, se debe considerar que la T_g puede variar en el tiempo debido a varios parámetros del entorno (humedad, temperatura,...). Las altas temperaturas pueden actuar como un postcurado del material y por tanto incrementar la T_g . La absorción de humedad por parte de la resina reducirá en cambio su T_g (ver apartado 5.5.1). Si el elemento reforzado está sujeto a altas temperaturas, un adhesivo con una correspondiente elevada T_g debe ser seleccionado. Existen dos posibilidades: puede utilizarse una resina de curado frío con una elevada T_g inicial, o un postcurado puede realizarse en la resina para alcanzar una T_g mayor. Esta temperatura para un sistema FRP concreto puede obtenerse de la empresa que lo manufactura.

5.4 - DISEÑO Y PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO

Debido a la baja resistencia a las temperaturas de la mayoría de los materiales polímeros reforzados con fibras, la resistencia de los sistemas FRP adheridos externamente se da por hecho que se pierde completamente en un incendio. Las fibras de carbono sí tienen alta resistencia a las altas temperaturas pero no ocurre así con las resinas epoxi. Por esta razón, el elemento estructural sin el sistema de refuerzo FRP debe poseer la resistencia suficiente para aguantar todas las cargas que le corresponden durante un incendio.

Si se mantiene un criterio de cálculo, de general aceptación y aplicación en refuerzos estructurales, por el que se debe satisfacer que el valor de cálculo de la respuesta estructural del elemento sin reforzar sea mayor que el valor característico

del efecto de las acciones, es decir, que la estructura sin reforzar tenga al menos un coeficiente de seguridad mayor o igual que 1, se garantizará que, en servicio, si el material de refuerzo falla la estructura no colapsará, estando entonces el tiempo de resistencia al fuego condicionado por la resistencia al fuego del elemento de hormigón.

Si, en cambio, el coeficiente de seguridad residual es menor que 1, deberá proyectarse, en cada caso, una protección contra fuego suficiente como para asegurar que durante el tiempo deseado las resinas epoxi no alcancen su temperatura de transición vítrea.

Este hecho condiciona en gran medida la decisión de propuesta de refuerzo mediante polímeros reforzados con fibras en estructuras de hormigón armado en casos particulares o la necesidad de prever un recubrimiento ignífugo que evite la pérdida de las propiedades del refuerzo.

5.4.1 - Elementos reforzados sin protección al fuego

En este caso, el refuerzo de un elemento de hormigón armado se perderá rápidamente en un incendio, debido a las altas temperaturas que debilitan la capa adhesiva entre el hormigón y el refuerzo FRP. La resistencia al fuego de un elemento reforzado puede ser evaluada por el análisis de la sección de hormigón armado sin reforzar (accidental). De ahí que la resistencia al fuego debe ser evaluada utilizando datos (dimensiones mínimas y mínimo recubrimiento de hormigón para los diferentes tipos de elementos) mediante un método de cálculo simplificado (análisis térmico y mecánico con reducidas propiedades del material) o con método general de cálculo (análisis térmico y mecánico con propiedades del material dependientes de la temperatura). Se debe tener en cuenta que los valores de cálculo deben corresponder de acuerdo al nivel de carga accidental del elemento reforzado. Por tanto, los valores deben tomarse de acuerdo con el más alto nivel de carga del elemento reforzado.

5.4.2 - Elementos reforzados con protección al fuego

Cuando se dota al elemento reforzado de protección al fuego, la resistencia al fuego debe evaluarse utilizando un método de cálculo más refinado. La evaluación consistirá en un análisis térmico que determine la distribución de temperaturas en el elemento, seguido de un análisis mecánico con las propiedades del material dependientes de la temperatura. El dimensionado de la protección se basará en limitar el aumento de la temperatura en la capa del adhesivo, el elemento más débil de la sección, durante un cierto tiempo. Esta limitación de la temperatura depende del tipo de adhesivo aplicado pero normalmente estará entre los 50-100°C.

5.5 - HUMEDAD

5.5.1 - Efecto de la absorción de agua en el FRP

La presencia de humedad es un parámetro ambiental particularmente riguroso para todos los materiales estructurales. El acero oxida, el hormigón puede sufrir carbonatación y la resina puede abrirse. Con los materiales compuestos FRP, el primer asunto es cómo de bien la matriz de resina resiste los efectos de una prolongada exposición al agua, sea dulce o salada. La experiencia en la industria militar y naval ha demostrado que los efectos tienen lugar en un largo periodo de tiempo.

La absorción de humedad produce cambios volumétricos en la resina (se hincha), quien a su vez provoca cambios dimensionales en el material. La matriz de resina absorberá agua. La cantidad de agua es dependiente del tipo de resina y de la temperatura del agua. Los dos efectos inmediatos de la absorción de agua en la matriz son la reducción de la temperatura de transición vítrea y un entumecimiento de la resina. Ambos efectos son parcialmente reversibles en la resina epoxi cuando el agua es apartada por secado. En las resinas de poliéster y viniléster los cambios pueden ser reversibles o no, dependiendo del tiempo y la temperatura de exposición. La resina epoxi no tiene enlace de tipo ester en su estructura y de este modo no es fácil la reacción con el agua de la cadena polímera. El valor máximo de captación de agua del 3% del peso es lo normalmente indicado para adhesivos estructurales.

Los compuestos de fibra de carbono son relativamente inertes al agua y por ello los únicos efectos son los que produce la humedad en la resina matriz. En la fibra de vidrio puede producirse por la intrusión de la humedad en la interfase fibra-resina provocando una pérdida de resistencia. Las fibras de aramida absorben hasta un 13% en peso de humedad que puede tener un efecto perjudicial en la resistencia a tracción y puede afectar a la interfase fibra-resina.

5.5.2 - Durabilidad de un sistema Hormigón – FRP

Es crucial considerar previamente las condiciones del hormigón existente, incluyendo la armadura interna, para reforzar a fin de asegurar la calidad del adhesivo y la longevidad del sistema. Los problemas básicos existentes deben ser reparados antes de ejecutar el refuerzo sino el agua y sustancias químicas pueden todavía penetrar en el hormigón para deteriorar aun más el sistema por acciones de despegue o desprendimiento debido a tensiones localizadas que pueden aparecer. Estas tensiones pueden deberse a problemas ambientales y que incluye “charcos” de agua temporales entre la interfase hormigón-FRP.

La presión interna del poro es también otro asunto muy importante en relación con las propiedades de barrera contra la humedad del FRP. Como el refuerzo FRP tiene un efecto secundario de precintado en el hormigón, estas presiones internas se acumularán localmente. Para permitir la transferencia de humedad en elementos reforzados con FRP, son necesarios suficientes huecos (zonas sin refuerzo exterior adherido). Estos huecos a su vez también pueden permitir el paso de un exceso de humedad o materiales nocivos.

En el caso de aplicaciones interiores y climas suaves con el hormigón correctamente restaurado, los efectos de encapsulación como barrera de vapor del FRP en el hormigón son mínimos. La encapsulación completa de un elemento de hormigón mediante FRP puede incluso incrementar su longevidad protegiéndolo de unas condiciones muy duras (sustancias químicas, marinas,...). No obstante, en caso de un hormigón pobre, la encapsulación es un riesgo si elemento está expuesto a un ciclo climático extremo y/o excesiva humedad.

Las aplicaciones de un FRP a un elemento estructural que está en riesgo de contener agua en su interior no deben implicar el encapsulado completo del hormigón. Buenas condiciones internas y superficiales del hormigón, preparación correcta de la superficie y una correcta aplicación de un adecuado sistema FRP pueden reducir sustancialmente el riesgo.

5.6 - EFECTOS DE LA TEMPERATURA

5.6.1 - Hielo-Deshielo

Como el refuerzo es aplicado a estructuras existentes, éstas pueden estar agrietadas antes de la aplicación del refuerzo. La adherencia del FRP en el hormigón puede no ser perfecta, y algunos vacíos pueden presentarse en la capa interfase entre el hormigón y el FRP. La expansión del agua congelada en estas grietas o huecos puede causar delaminación del FRP en la interfase hormigón-FRP. De ahí que debe ser considerado el efecto cíclico de hielo-deshielo en el comportamiento de las estructuras reforzadas.

Se han realizado varios estudios del comportamiento de vigas reforzadas con ciclos de hielo-deshielo entre -20°C y $+20^{\circ}\text{C}$ sobre vigas con grietas y sin grietas, todas ellas reforzadas. No se ha encontrado un comportamiento negativo en los elementos ensayados después de los ciclos comparado con el comportamiento de referencia de los mismos. Como resultado obtenemos que con resinas de alta calidad no se observan efectos negativos salvo en el caso concreto del hormigón donde, si es de baja calidad, sí tenemos problemas y contribuye a la degradación del material compuesto. Por lo tanto, estos ensayos han demostrado el buen comportamiento de los FRP que mantienen parte de su resistencia con un hormigón pobre, más que el ciclo hielo-deshielo del sistema conjunto hormigón-FRP. Los resultados han demostrado que el daño comienza en la superficie sin precintado de refuerzo más que dentro del área reforzada.

5.6.2 - Comportamiento del adhesivo ante altas y bajas temperaturas

Es bien conocido que cuando los FRP se utilizan junto con el hormigón para formar una viga o elemento mediante material compuesto adherido, el comportamiento del sistema no solo depende de los materiales individuales sino también de las propiedades de las interfases involucradas en la junta, las interfases laminado-adhesivo y adhesivo-hormigón.

Sin embargo, en condiciones extremas de temperatura, el comportamiento y la integridad de las juntas están más condicionadas por las propiedades de los componentes (hormigón, adhesivo o laminado) en lugar de las interfases involucradas en la junta. De este modo, en general, para altas temperaturas el comportamiento está más condicionado por las propiedades del adhesivo, mientras que para bajas temperaturas está más condicionado por las propiedades de la resina matriz, en el caso de refuerzos mediante laminados.

Muestras ensayadas a -30°C y -100°C mostraron diagramas de desviaciones de carga con caídas repentinas de carga. Por el contrario, muestras ensayadas a $+40^{\circ}\text{C}$ mostraron un comportamiento uniforme. Es más, los ensayos en las muestras ofrecieron diferente tipo de fallo con variaciones de temperatura. Las muestras ensayadas a $+40^{\circ}\text{C}$ experimentaron fallo del adhesivo en el grosor de pegado (fallo cohesivo). Las muestras de laminados con alto módulo de elasticidad ensayadas a -30°C mostraron fallo interlaminar del refuerzo, y fallo a cortante del hormigón apareció para esos refuerzos con bajo módulo de elasticidad. Las muestras ensayadas a -100°C mostraron fallo interlaminar del refuerzo en ambos casos.

Los ensayos nos han enseñado que las muestras ensayadas a fallo bajo altas o bajas temperaturas muestran no solo variaciones en la fuerza del adhesivo, sino también significantes diferencias en la naturaleza del despegue.

5.7 - EXPOSICIÓN A LA LUZ UV

Los materiales poliméricos experimentan degradación cuando se exponen a los rayos UV-A (longitudes de onda entre 315 nm y 400 nm) y a UV-B (longitudes de onda entre 280 nm y 315 nm), que pueden causar disociación de los adhesivos químicos. La subsiguiente reacción con el oxígeno puede conducir tanto a corte de cadenas, hidrólisis o pérdida de otras pequeñas moléculas.

Los cambios en la superficie de los materiales compuestos debidos a la luz solar son algunas de las primeras manifestaciones y posiblemente más críticas de la exposición al entorno. La luz del sol y especialmente la luz ultravioleta pueden conducir a la reducción de la transmisibilidad de la luz y cambios de color en el material compuesto. Puede también tener influencia en las propiedades mecánicas del compuesto. Aunque los cambios de color y la decoloración pueden ser frecuentemente observados por el público como una reacción reductora de resistencia, en realidad es únicamente una condición superficial que usualmente no es indicativa de cambios en la integridad estructural o daños físicos. Los cambios de colores son fundamentalmente debidos a la influencia de la luz UV en la resina matriz y no en el

material de refuerzo. En efecto, las fibras de carbono no son afectadas ni mucho menos por los rayos UV.

En general, las propiedades mecánicas de los materiales compuestos son afectadas de forma leve por la exposición a la luz UV. No obstante, la cantidad de deterioro es dependiente del tipo de resina y de la colocación y orientación del refuerzo.

- Tipo de resina

Las resinas de poliéster son más susceptibles de sufrir daños con la exposición a la luz UV que las resinas epoxi, aunque también tienen una similar reducción de su resistencia. Esta reducción de resistencia en los materiales compuestos puede producir que sean más susceptibles de sufrir aplastamiento o fisuraciones en la matriz. Esto puede conducir a otros problemas relacionados con el entorno como un incremento de la absorción de humedad y/o ataques químicos.

- Colocación y orientación del refuerzo

La importancia de la orientación de la fibra dentro del material compuesto está vinculada a la resina matriz. Las propiedades dominantes de la fibra, como la resistencia a tracción y flexión de los materiales compuestos, tienden a mostrar una muy pequeña degradación debido a la exposición a la luz UV. No obstante, las propiedades dominantes de la matriz, como la resistencia a cortante, son significativamente afectadas debido a la reducción de resistencia de la resina.

Existen muchísimas variables e incertidumbres asociadas con la metodología de ensayos aplicada actualmente:

- Ensayos al aire libre: variedad en la climatología de diferentes lugares, diferentes estaciones del año, diferente año,...

- Ensayos de laboratorio: la reproducibilidad de los mecanismos para simular los factores climáticos es generalmente pobre.

En muchos estudios, los efectos de la luz UV no están aislados de los efectos higrotérmicos. Por lo tanto es difícil atribuir cambios en las propiedades únicamente a los efectos UV. Diferentes tipos de ensayos realizados sobre los materiales compuestos de fibra de carbono y resina epoxi muestran que no se produce degradación en los materiales ni reducción de sus propiedades mecánicas.

Muchas de las aplicaciones de los sistemas de refuerzo FRP deben tener en cierto modo requerimientos con respecto a la pintura de protección UV. La protección UV puede ser proporcionada por el uso de cualquier pintura en base acrílica o pintura en base de poliuretano. La pintura debe ser aplicada en 72 horas y mientras la resina esté todavía pegajosa al tacto. Si la resina ha curado, entonces debe llevarse a cabo el cepillado o rascado de la superficie antes de pintar. Dos capas de acabado son requeridas normalmente.

5.8 - ALCALINIDAD-ACIDEZ

El rendimiento de un refuerzo CFRP conforme avanza el tiempo en un entorno ácido o alcalino dependerá de la matriz y de la fibra de refuerzo. Las fibras de carbono sin protección son resistentes a entornos ácidos y alcalinos donde la fibra de vidrio sí puede sufrir degradación. Sin embargo una aplicación correcta de la resina aislará y protegerá la fibra y pospondrá la degradación.

De este modo, las estructuras de hormigón armado ubicadas en entornos de alta alcalinidad y alta humedad o humedad relativa, deben ser reforzadas aplicando fibras de carbono.

5.9 - CORROSIÓN Y FATIGA

La corrosión se produce cuando la atmosfera o el entorno son de naturaleza corrosiva pero no lo suficiente para que la corrosión sucediera sin la adición de tensión. Este fenómeno está relacionado con el tiempo, nivel de tensión, el entorno, la matriz y la fibra. Es presunto que el fallo sea prematuro desde que el FRP falla por debajo de su resistencia última.

La fibra de carbono no es afectada relativamente por la tensión de corrosión hasta niveles de tensión del 80% de la última. En cambio, las fibras de vidrio y aramida son susceptibles a la corrosión. La calidad de la resina tiene un efecto significativo en el tiempo de fallo y de niveles de tensión sostenibles. Se recomienda que cuando el refuerzo adherido externamente va a soportar una considerable carga continua, la primera opción de diseño sea con materiales compuestos de fibra de carbono.

En el caso de estudio de la fatiga, una considerable cantidad de datos para el comportamiento a fatiga y predicción de duración de materiales de refuerzo se han realizado en los últimos años.

Para todos los tipos de materiales compuestos en aplicaciones estructurales, los CFRP son los menos propensos a fallo por fatiga. Una resistencia a fatiga del 60 al 70% de la resistencia última inicial del CFRP es un valor típico de resistencia que se alcanza después de muchos ciclos de ensayo. No es aplicable al caso de fibras de vidrio donde otros factores como el entorno, humedad y alcalinidad también juegan un importante papel porque le afectan más. En el caso de las fibras de aramida, también ofrecen una buena respuesta, con valores de resistencia a fatiga se encuentran entre el 54 y 73% de la resistencia última.

Los materiales compuestos unidireccionales avanzados como el CFRP exhiben mejor rendimiento a la fatiga incluso que en el caso del acero. Investigaciones han demostrado que el factor dominante en la fatiga de las vigas reforzadas con CFRP es la fatiga del acero existente en la estructura. Se recomienda por lo tanto que los criterios de diseño a fatiga para los refuerzos CFRP deben ser limitados al rango de tensión en las armaduras permitido en una viga sin reforzar.

5.10 - IMPACTO

Las propiedades de impacto de un material representan su capacidad para absorber y disipar la energía bajo un impacto o carga de choque. El conocimiento del comportamiento al impacto de los refuerzos FRP está relativamente limitado. Las comparaciones de resultados de varios ensayos muestran un buen trabajo bajo cargas de impacto en los elementos reforzados con laminados CFRP, aunque no pueden dotar de la misma absorción de energía que los elementos reforzados con acero. Es en los casos de materiales con las fibras unidireccionales orientadas en la dirección de la tensión máxima cuando se exhibe la mayor energía al impacto. Un anclaje adicional al menos al final del refuerzo exterior como suplemento del adhesivo epoxi y para prevenir el prematuro despegue del refuerzo CFRP, mejoraría la resistencia al impacto de los elementos de hormigón.

En caso de que el material compuesto no falle por completo por carga de impacto, todavía será capaz de soportar cargas, incluso si ha sido sufrido daños tanto internos como superficiales.

5.11 - SEÍSMO

En el diseño de sistemas FRP para la rehabilitación de una estructura posterior a un seísmo, es apropiado aplicar los principios de cálculo del trabajo que asumen que una estructura debe desarrollar sus capacidades completas y requiere que todos sus elementos estén capacitados para resistir la resistencia a cortante exigida. Los sistemas FRP, deben ser diseñados para proporcionar la resistencia sísmica a través de la disipación de la energía y capacidad de deformación.

La mayor parte de las investigaciones en torno al refuerzo sísmico de estructuras se centran en el refuerzo de pilares. Los sistemas CFRP se aplican para el confinado de columnas para mejorar la resistencia a compresión del hormigón e incrementar la resistencia a cortante.

CAPÍTULO 6

EJECUCIÓN EN OBRA

6.1 - INTRODUCCIÓN

Los procedimientos para la instalación de sistemas de refuerzo CFRP han sido desarrollados por las guías de diseño y también mediante catálogos técnicos de las empresas que lo comercializan y, a menudo, existen diferencias entre sistemas. Además, los procedimientos de instalación pueden variar del propio sistema de refuerzo, en función del tipo y condición de la estructura.

Los instaladores del sistema CFRP deben ser contratistas cualificados de acuerdo con el proceso de instalación desarrollado por la empresa manufacturera. No deben permitirse las desviaciones de los procedimientos sin previa consulta con las empresas manufactureras.

El contratista de la instalación de un sistema de refuerzo CFRP debe demostrar las competencias para ejecutar las fases de preparación de la superficie y aplicación del sistema de refuerzo. Las competencias del contratista pueden ser demostradas siempre y cuando existen datos de formación y documentación de trabajos relacionados ejecutados anteriormente de todas o cada una de las fases que completan el sistema. La empresa que comercializa el sistema debe a su vez formar a al personal aplicador de los procedimientos de instalación de su sistema y garantizar su competencia para la ejecución.

La temperatura, la humedad relativa y la humedad de la superficie en el momento de la instalación afectan al rendimiento de los sistemas CFRP. Las condiciones que deben comprobarse antes y durante la instalación incluyen la temperatura superficial del hormigón, temperatura del aire, humedad relativa y punto de rocío.

La imprimación y adhesivos de epoxi no deben aplicarse sobre superficies frías y heladas, y tampoco mojadas o húmedas. Las empresas de productos CFRP disponen de fichas técnicas con datos para las condiciones de aplicación. Existen soluciones y alternativas ante adversidades de este tipo que también pueden ser consultadas con estas empresas. El comportamiento de los elementos estructurales reforzados con fibras de carbono es altamente dependiente del sustrato de hormigón donde van a ser aplicados y de su perfilado y preparación previa. En caso contrario, pueden producirse despegues o delaminaciones del refuerzo provocando que no se alcance a transferir las cargas proyectadas. La preparación del sustrato puede generar ruido, polvo y molestias a los ocupantes del edificio, en su caso.

Los programas y criterios de la garantía y control de calidad deben llevarse a cabo por las empresas manufactureras, los contratistas de su instalación y resto de personal implicado en el proyecto. El programa de control de calidad debe ser extenso y cubrir todos los puntos del proyecto de refuerzo, con mayor o menor grado de alcance en función de la complejidad del proyecto. La garantía de calidad se consigue a través de una serie de inspecciones y test para documentar el visto bueno de la instalación. Las especificaciones del proyecto deben incluir un plan de control para la instalación y curado de los sistemas CFRP.

Como en cualquier trabajo de reparación o refuerzo, el propietario debe revisar y evaluar periódicamente el estado del refuerzo mediante el sistema CFRP. Las causas de cualquier daño o deterioro detectadas en inspecciones rutinarias deben ser

identificadas y localizadas antes de cualquier actuación de reparación y mantenimiento.

6.2 - REFUERZO CON LAMINADO. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de materiales compuestos comprende laminados de polímeros reforzados con fibra de carbono y resina epoxi como adhesivo estructural. El principal campo de aplicación es el refuerzo de elementos constructivos, forjados y vigas, a esfuerzos de flexión. Ambos productos son aplicados directamente en la obra.

Las empresas que comercializan el producto disponen de diferentes tipos de laminados en el mercado, de forma que se adapte a las necesidades del cálculo y su puesta en obra. A destacar, varias dimensiones de ancho y espesor del laminado, lo que nos determina diferentes secciones de refuerzo, y varias alternativas de módulo de elasticidad y resistencia a la tracción de la fibra de carbono, adoptando la que más se ajuste a nuestras exigencias. Toda la información, fichas técnicas y consulta pueden solicitarse a las empresas manufactureras.

Existen una serie de productos complementarios para la preparación del soporte de hormigón armado a reforzar, previo a la colocación del refuerzo, y para el acabado una vez ejecutado el refuerzo. Los iremos analizando durante el estudio del proceso de ejecución en obra.

6.2.1 - Consideraciones previas

Previo al inicio de los trabajos debemos:

- Revisar las especificaciones del proyecto con detalle.
- Inspeccionar las superficies para la ejecución de los trabajos, y en el caso de que se detecten imperfecciones en ellas según las condiciones generales, dar parte para subsanar dichos problemas.
- Preparar y chequear todo el equipo y materiales a usar. Se recomienda que los laminados se corten en las longitudes correspondientes a aplicar antes de cualquier trabajo, como puede ser el mezclado de la resina, con las herramientas adecuadas (tijeras especiales, radial o sierra).
- Proteger los objetos, hormigón, vehículos en garajes,... en los alrededores de la zona de trabajo del polvo o de los daños debido a los trabajos de preparación o refuerzo.



Figura 6.1 Corte del laminado, con sierra y tijeras especiales

6.2.2 - Consideraciones para una buena adhesión

Los sistemas de refuerzo mediante laminados de fibra de carbono deben ser aplicados por profesionales con experiencia. Se debe cumplir la estructura del sistema tal y como indica la hoja de datos de producto de la empresa manufacturera sin posibilidad de variarse.

Se debe apuntar los números de lote de los productos laminados y de la resina usadas cada día.

Durante la ejecución, hay que chequear para asegurarse que el pegado del laminado es continuo, sin burbujas ocluidas entre este y el soporte. También chequear los cruces de laminados para que la aplicación del adhesivo estructural sea continua.

La vida de mezcla de la resina se puede acortar si se mezclan grandes cantidades y/o a altas temperaturas. A fin de prolongar la vida de mezcla, reducir las cantidades de los componentes de la mezcla y/o la temperatura de los materiales.

Para la aplicación en condiciones de frío o calor, se deben controlar las condiciones previas del material almacenado durante 24 horas para mejorar el mezclado, aplicación y los límites de la vida de mezcla.

Se debe tomar especial atención en las condiciones ambientales. Observar las temperaturas mínimas/máximas del soporte, del ambiente y de los materiales así como el punto de rocío (Temperatura de aplicación $> +5$ °C).

La humedad del soporte debe ser menor del 4%. Es un dato importante a su vez puesto que una vez aplicado el refuerzo va a funcionar como barrera impidiendo el secado de la superficie de hormigón. De forma que todas las superficies de hormigón deben estar secas, libres de humedad y sin escarcha.

6.2.3 - Medidas de seguridad en la obra

Exigir siempre la utilización de la ropa de protección adecuada (guantes, gafas, mono cerrado y casco). En las hojas de seguridad de los productos comercializados también aparece más información al respecto.

- **Limpieza**

Limpiar todo el equipo cada día. La resina epoxi fresca se puede limpiar con una brocha o trapo mojado con disolvente.

- **Eliminación**

Las resinas una vez endurecidas solo pueden ser eliminadas mediante medios mecánicos. Las herramientas se limpiarán inmediatamente después de su uso con un limpiador a base de disolventes.

Si sobra resina sin curar pero mezclada en los recipientes al final del día, colocar sobre una lámina de polietileno delgada sobre el suelo para que cure en pequeña proporción y no genere exceso de calor, o pasarla a recipientes más pequeños.

6.2.4 - Preparación de la superficie

Las superficies a tratar se presentarán de tal manera que en el momento de ejecutar los trabajos de refuerzo, estén en perfectas condiciones, para lo cual se eliminarán las lechadas superficiales, manchas, suciedad, partes mal adheridas, restos de otros oficios, armaduras expuestas o con síntomas de corrosión.etc., y la superficie seca.

Las superficies de hormigón se prepararán mediante medios mecánicos, como son chorro de arena, chorro de agua a alta presión, chorro mixto, o mediante repicado, cincelado, escarificado, abujardado.

-Chorro de arena

Es la más indicada para este tipo de trabajos. Consiste en proyectar sobre el soporte un chorro de arena de sílice mediante un compresor de caudal variable en función de la distancia al soporte, con una presión de 7 atm aproximadamente. La granulometría de la arena estará comprendida entre 1 y 2 mm y el operario que realice el trabajo actuará provisto de una escafandra protectora ventilada con aire fresco.

-Agua a alta presión

Consiste en proyectar sobre el soporte agua con una presión mínima de 150 atm, mediante un equipo especial, a través de una lanzadera provista de una boquilla adecuada y con una presión en bomba controlada con un manómetro.

-Chorro de agua-arena

Sistema combinación de los otros mencionados, en el que se utiliza básicamente el equipo de chorro de agua a alta presión y una lanza de proyección con un dispositivo que permite incorporar la arena de sílice en la boquilla (Efecto Venturi).



Figura 6.2 Preparación de la superficie mediante chorro de arena

Todas las superficies se deben repasar con el compresor de aire limpio y aspirar para eliminar todo el resto de polvo. Las fisuras existentes en el hormigón con ancho 0'25 mm se inyectarán previamente con una resina de baja viscosidad, base epoxi.

En el caso en que se requiera o se especifique protección anticorrosión, aplicaremos los productos existentes y normalizados de protección contra la corrosión sobre la superficie del hormigón; posteriormente será necesaria la utilización de imprimación para el adhesivo epoxi.

Después de la preparación de la imprimación, se debe limpiar la superficie y aspirarla hasta obtener una superficie libre de polvo. Todas las superficies se deben repasar con el compresor de aire limpio y aspirar para eliminar todo el resto de polvo.

Según las recomendaciones, la superficie que se va a reforzar tiene que estar nivelada con resaltos y oquedades menores de 0,5 mm. Se debe comprobar la planeidad y nivelación de la superficie con una regla. Para regla de 2 m, la tolerancia máxima es de 4 mm y para regla de 0,3 m de longitud 2 mm, pero nunca mayores de 0,5 mm para marcas de encofrado o pequeños escalones. Las tolerancias serán más restrictivas si la normativa local lo exige.

Para la reparación o eliminación de las irregularidades se procederá a la aplicación de morteros de reparación, seleccionando el tipo de mortero a aplicar en función del espesor de las irregularidades, según sea superior o inferior a 5 mm.

6.2.5 - Resina epoxi. Mezclado

La resina epoxi es un producto bicomponente. Para su aplicación, mezclar los dos componentes A y B durante al menos 3 minutos con una batidora eléctrica de bajas revoluciones (máx. 600 r.p.m.) hasta que el material tenga una consistencia y

color gris homogéneo. Verter la mezcla en un recipiente y batir nuevamente durante 1 minuto aproximadamente. Es importante respetar los tiempos de mezclado para el correcto endurecimiento de la resina.

Proporción de la mezcla A:B = 3:1 en peso o volumen.

Generalmente el soporte suele estar fino, la limpieza con chorro abrasivo lo deja ligeramente rugoso. Esto influirá en el consumo de la resina.



Figura 6.3 Presentación resina epoxi y mezcla de los dos componentes

6.2.6 - Aplicación del refuerzo de CFRP

Debido a su baja densidad, no se requieren medios auxiliares de apuntalamiento, de manera que no se interfiere en el desarrollo del resto de trabajos de la obra.

Para la puesta en servicio hay que tener en cuenta que el adhesivo va adquiriendo sus resistencias desde el momento en que es colocado hasta conseguir el endurecimiento total a los 7 días. Por lo tanto es necesario esperar 7 días hasta sobrecargar el elemento estructural a su carga máxima, pudiendo cargarse previamente con sobrecargas inferiores que no hagan superar el límite de resistencia del adhesivo en cada momento.

- Aplicación de la Resina-Adhesivo

Antes de empezar la aplicación de la resina sobre el soporte previamente preparado, se deben preparar los laminados, que ya estarán cortados en las longitudes adecuadas. Esta preparación de los laminados consiste en su limpieza, se coloca el laminado sobre una mesa limpia, se limpia la superficie no serigrafiada con

líquido limpiador a base de disolventes orgánicos usando un paño limpio. En el caso de que se tenga que colocar capas adicionales de laminados, se limpiarán ambas caras.



Figura 6.4 Colocación del laminado en la mesa de trabajo y limpieza con disolvente

Una vez limpio el laminado, se colocará una capa de adhesivo cuidadosamente sobre el soporte con una espátula formando una capa fina (aproximadamente 1 mm.)



Figura 6.5 Colocación del adhesivo epoxi sobre la superficie

A continuación, o a la vez, se aplica el adhesivo sobre el laminado con una espátula especial de forma curvada o con ayuda de una herramienta la cual se puede

construir fácilmente con una tabla de madera, dos listones y una chapa metálica. Se pegan los dos listones a la tabla con la separación correspondiente al laminado, a mitad de los listones se clava la chapa metálica dejando una altura libre desde la tabla de madera de 2'2 mm aprox., de manera que el espesor de adhesivo aplicado sea de 1 mm.

Con esta herramienta garantizamos que la aplicación del adhesivo sobre el laminado será continua y uniforme.



Figura 6.6 Herramienta casera para una correcta aplicación del adhesivo sobre el laminado

- **Colocación del laminado de fibra de carbono**

Dentro del tiempo abierto del adhesivo, colocar el laminado de refuerzo con adhesivo epoxi sobre la superficie del soporte donde se haya aplicado previamente la resina. Usando un rodillo de goma presionar el laminado hasta que el adhesivo sea forzado a salir por ambas caras del mismo. Retirar el adhesivo sobrante.

Evitar aplicar una fuerza excesiva al pasar el rodillo de goma sobre el laminado para evitar la salida excesiva de adhesivo por ambas caras del laminado, de forma que quede menor espesor de adhesivo del adecuado.

No realizar solapes de laminados (uniones longitudinales), ya que esa zona concreta se producen picos de tensión los cuales pueden llevar al colapso de la unión adherida, produciéndose el despegue del laminado. Es decir, el refuerzo mediante laminados de CFRP debe ser continuo. Los materiales se comercializan en rollos de forma que la longitud del laminado se puede adaptar a nuestras necesidades, evitando cortes y solapes entre unidades.



Figura 6.7 Colocación del laminado sobre soporte y presionando con uso de rodillo

- Disposiciones generales de colocación de los laminados

El refuerzo a flexión mediante laminados adheridos por la cara externa del elemento a reforzar implica la posibilidad de colocación del mismo en la cara inferior del elemento, momentos negativos, o en la cara superior, momentos positivos (menos frecuente).

El cálculo nos indica el número de laminados a colocar y sus longitudes totales, donde también se incluye la longitud de anclaje que prevea el cálculo.

Respecto a la separación entre laminados, se debe tener en cuenta una separación mínima igual al recubrimiento de las armaduras del hormigón según la exposición del ambiente, esta separación mínima se debe de cumplir al igual para los bordes del hormigón, y además una separación máxima entre laminados que cumpla los dos requisitos siguientes: $S_{f,max} \leq 0'2 \cdot L$ (longitud del vano); $\leq 5 \cdot h$ (canto total).

La orientación del laminado de FRP debe ser en la dirección principal del esfuerzo. Pequeñas desviaciones en la orientación del laminado de FRP, tan solo de 5 grados, puede ocasionar reducciones sustanciales del refuerzo.

- Capas adicionales o cruces entre laminados

Donde haya un cruce de laminados, el primer laminado se debe limpiar con disolvente antes de aplicar el adhesivo y colocar el segundo laminado. En la zona del cruce se aplicará una capa de adhesivo epoxi tanto sobre el soporte como en el laminado, de forma que no se cree una zona cóncava.

También se produce un cruce de laminados cuando se refuerza a flexión y a cortante.



Figura 6.8 Cruce de laminados en forjado y viga

- **Preparación para el recubrimiento del laminado**

Los laminados de fibra de carbono pueden ser protegidos frente al fuego si fuera necesario con un material resistente al fuego. También se pueden recubrir por cuestiones estéticas.

Sobre la cara vista del laminado (que previamente a su colocación se limpió con disolvente) se aplica una capa de adhesivo epoxi y en fresco se espolvorea arena de cuarzo, que actuará como superficie de agarre para el recubrimiento posterior.

6.2.7 - Recubrimiento de los laminados

El laminado se puede recubrir con pinturas contra la carbonatación y la acción de rayos UV.

También se puede recubrir con morteros, escayolas, etc. siempre que se desee tapar por cuestiones estéticas o por protección contra los rayos UV.

Si se deseara proteger el refuerzo contra el fuego cuando venga especificada dicha necesidad, se recomienda la utilización de placas ignífugas. También se pueden utilizar pinturas ignífugas, previa comprobación de la adherencia y compatibilidad con el laminado mediante ensayos previos.

Para una mayor protección mecánica/química se puede aplicar puente unión y mortero tixotrópico o enyesar y luego pintar.

Se debe proteger el sistema de refuerzo mediante laminados, tanto durante la instalación como una vez finalizada para el curado correcto del adhesivo, de las temperaturas adversas, del contacto directo con la lluvia, polvo o suciedad, de la acción directa del sol, y de la alta humedad. Esta protección se puede realizar con plásticos.



Figura 6.9 Detalle del recubrimiento de los laminados con pintura

6.2.8 - Inspección

La dirección facultativa observará continuamente todos los aspectos de preparación, mezclado y aplicación de los materiales, incluido lo siguiente:

- Preparación de la superficie.
- Las etiquetas del envase del material.
- El mezclado de la resina.
- La aplicación de la resina de las fibras.
- El curado del material compuesto.
- Toma de muestras.
- Todos los aspectos relacionados con el refuerzo mediante los materiales compuestos CFRP.

Una vez finalizados los trabajos de instalación del refuerzo se pueden realizar los siguientes ensayos:

- Ensayos semi-destructivos, Pull-off: ensayos de adherencia.
- Ensayos no-destructivos, se comprueba la uniformidad de la aplicación del refuerzo de FRP con diversas técnicas como pueden ser ultrasonidos.
- Pruebas de carga.

6.3 - REFUERZO CON LAMINADO EN L. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de materiales compuestos comprende laminados de polímeros reforzados con fibra de carbono y resina epoxi como adhesivo estructural. El principal campo de aplicación es el refuerzo de elementos constructivos, vigas, a esfuerzos de cortantes. Ambos productos son aplicados directamente en la obra.

Existen una serie de productos complementarios para la preparación del soporte de hormigón armado a reforzar, previo a la colocación del refuerzo, y para el acabado una vez ejecutado el refuerzo. Los iremos analizando durante el proceso de ejecución en obra.

Como nota, destacar que sólo una empresa comercializa los refuerzos laminados de fibra de carbono en L, con varias longitudes del brazo, pero dada su perfecta validez en la práctica, se ha optado por incluirla para su estudio y para una mejor comprensión de las variantes que los materiales compuestos de fibra de carbono nos ofrecen para el refuerzo de estructuras.

6.3.1 - Consideraciones previas

Todas las consideraciones previas aplicadas al refuerzo mediante laminado son aplicables para este tipo en concreto; el funcionamiento del sistema es similar al laminado y sus componentes, los mismos. La variante del formato en que se presenta el laminado para el caso concreto de refuerzo a cortante, sí implica en cambio algunos detalles en la preparación del soporte y en el proceso de ejecución que analizaremos a continuación.

6.3.2 - Preparación del soporte

Se deberá dejar preparada la zona de anclaje de los laminados. Esta preparación consiste en la realización de unos agujeros, lo más cercanos posibles al alma de la viga, de manera que el espesor de adhesivo sea el necesario y no colocar mayor cantidad.

Se ejecutarán tres agujeros paralelos y secantes de 26 mm de diámetro, espaciados de 10 a 15 mm, para producir un agujero de oblongo de aproximadamente 50 mm de longitud.



Fig. 6.10 Detalle de las zonas ya preparadas para los angulares y los agujeros para anclaje

Para que el angular se ancle correctamente en la zona de anclaje, se debe pre-tratar previamente el brazo largo (por lo general, todo depende del canto del elemento estructural) con una capa de adhesivo epoxídico, aplicado con una llana dentada dejando acanaladuras espaciadas aproximadamente 5 mm desde la parte de arriba y por una altura de 100 – 200 mm (dependiendo de la longitud de diseño). Y el tiempo de espera/secado de la resina antes de colocar el laminado en el soporte debe ser de 24 horas.

Se rellenarán los agujeros realizados para el anclaje de los angulares con el adhesivo estructural epoxi. Una vez mezclado los dos componentes se meten en un cartucho vacío de silicona y se rellena el hueco. También se puede utilizar una resina epoxi específica para la fijación de anclajes.



Fig. 6.11 Detalle de las acanaladuras del angular

6.3.3 - Resina epoxi. Mezclado

Una vez limpio el angular, se colocará una capa de adhesivo cuidadosamente sobre el soporte con una espátula formando una capa fina (aproximadamente 1 mm).



Fig. 6.12 Preparación y aplicación de resina en el soporte

A continuación, se aplica el adhesivo epoxi sobre la cara interna del angular con una espátula especial de forma curvada. Se debe cuidar que no queden burbujas en la zona de adhesivo aplicado. El espesor de adhesivo que se debe extender sobre el laminado será de aproximadamente 1 mm.



Fig. 6.13 Aplicación de resina en el angular

6.3.4 - Aplicación del refuerzo en L

Dentro del tiempo abierto del adhesivo, insertar el angular con adhesivo dentro del hueco relleno de resina, de una forma ligeramente oblicua. Justo en el momento en el que se llega a la profundidad total se deben presionar los brazos del angular contra el soporte con un rodillo de goma hasta que el adhesivo sea forzado a salir por ambas caras del mismo (Fig. 5.3.5). Retirar el adhesivo sobrante (Fig. 5.3.6) y limpiar con disolvente el brazo inferior del angular, para permitir el posterior pegado del segundo angular.



Fig. 6.14 Esquema de trabajo: Introducir en el hueco para anclaje y después, pegado sobre el soporte



Fig. 6.15 Presión con el rodillo sobre el angular y posterior retirada del sobrante de resina

El angular en la cara opuesta del elemento estructural se aplicará exactamente igual que el primero. Sobre la superficie del brazo inferior del primer angular se debe colocar también un 1 mm de espesor de adhesivo epoxi (Fig. 5.3.8).

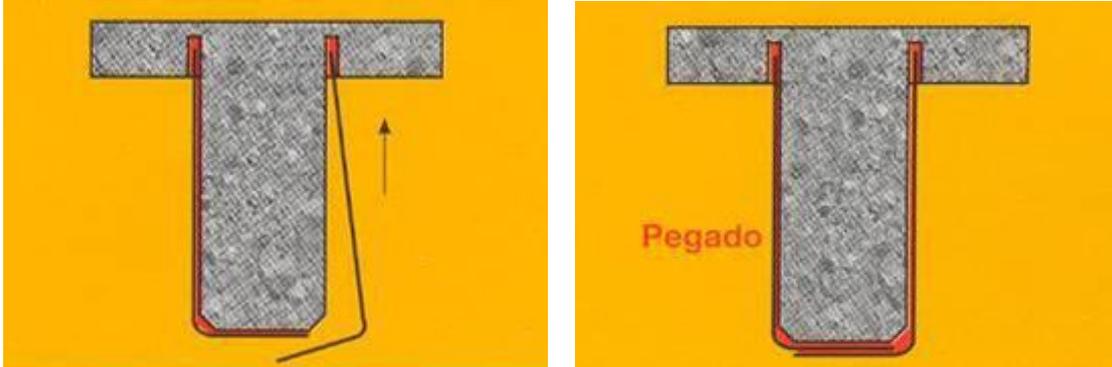


Fig. 6.16 Insertar el segundo angular en anclaje y pegado posterior sobre soporte y angular inicial



Fig. 6.16 Detalle de la aplicación de resina epoxi sobre el primer angular colocado

Evitar aplicar una fuerza excesiva al pasar el rodillo de goma sobre el angular para evitar la salida excesiva de adhesivo por ambas caras del angular, de forma que quede menor espesor de adhesivo del adecuado.

- Disposiciones generales de colocación de los laminados

Los refuerzos mediante laminados en L son exclusivos para trabajar a esfuerzos cortantes actuando como estribos adheridos externamente al elemento.

Para estos refuerzos en U las separaciones máximas entre bandas de laminados será igual a $0'8 \cdot d$ (donde d es el canto útil del elemento estructural).

De igual modo que hemos analizado en las cintas laminadas se resuelven los encuentros en varias capas y el tratamiento del laminado en L para su posterior recubrimiento.

6.4 - REFUERZO CON TEJIDO. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de materiales compuestos comprende tejido de polímero reforzado con fibras de carbono y resinas de impregnación epoxi. El campo de aplicación de este sistema abarca el refuerzo de elementos constructivos a esfuerzos de flexión, cortante y confinamiento, tales como forjados, vigas, muros y pilares. Ambos productos son aplicados directamente en la obra.

Las empresas que comercializan el producto disponen de diferentes tipos de tejido en el mercado, de forma que se adapte a las necesidades del cálculo y su puesta en obra. En este caso de tejido, encontramos diferentes densidades en el gramaje, lo que condiciona diferentes resistencia a la tracción y módulo elástico, varios anchos de tejido y direcciones principales de trabajo en función de la orientación de las fibras, unidireccional y bidireccional (existe también caso particular en 4 direcciones). Toda la información, fichas técnicas y consulta pueden solicitarse a las empresas manufactureras.

Existen una serie de productos complementarios para la preparación del soporte de hormigón armado a reforzar, previo a la colocación del refuerzo, y para el acabado una vez ejecutado el refuerzo. Los iremos analizando durante el proceso de ejecución en obra.

6.4.1 - Consideraciones previas

Previo al inicio de los trabajos debemos:

- Revisar las especificaciones del proyecto con detalle.
- Inspeccionar las superficies para la ejecución de los trabajos, y en el caso de que se detecten imperfecciones en ellas según las condiciones generales, dar parte para subsanar dichos problemas.
- Preparar y chequear todo el equipo y materiales a usar. Se recomienda que los tejidos se corten en las longitudes correspondientes a aplicar antes de cualquier trabajo, como puede ser el mezclado de la resina, con unas tijeras especiales.
- Prestar especial cuidado para no doblar ni romper las fibras. No doblar los tejidos.
- Proteger los objetos, hormigón, vehículos en garajes,... en los alrededores de la zona de trabajo del polvo o de los daños debido a los trabajos de preparación o refuerzo.

6.4.2 - Consideraciones para una buena adhesión

Los sistemas de refuerzo mediante tejidos de fibra de carbono deben ser aplicados por profesionales con experiencia. Se debe cumplir la estructura del sistema tal y como indica la hoja de datos de producto de la empresa manufacturera sin posibilidad de variarse.

Se debe apuntar los números de lote de los tejidos y de la resina usadas cada día.

Chequear para asegurarse que el tejido se aplica de forma uniforme y queda estirado.

La vida de mezcla de la resina se puede acortar si se mezclan grandes cantidades y/o a altas temperaturas. A fin de prolongar la vida de mezcla, reducir las cantidades de los componentes de la mezcla y/o la temperatura de los materiales.

Para la aplicación en condiciones de frío o calor, se deben controlar las condiciones previas del material almacenado durante 24 horas para mejorar el mezclado, aplicación y los límites de la vida de mezcla.

Se debe tomar especial atención en las condiciones ambientales. Observar las temperaturas mínimas/máximas del soporte, del ambiente y de los materiales así como el punto de rocío (Temperatura de aplicación > +5 °C).

La humedad del soporte debe ser menor del 4%. Es un dato importante a su vez puesto que una vez aplicado el refuerzo va a funcionar como barrera impidiendo el secado de la superficie de hormigón. De forma que todas las superficies de hormigón deben estar secas, libres de humedad y sin escarcha.

6.4.3 - Medidas de seguridad en la obra

Exigir siempre la utilización de la ropa de protección adecuada (guantes, gafas, mono cerrado y casco). En las Hojas de Seguridad de los productos comercializados también aparece más información al respecto.

- **Limpieza**

Limpiar todo el equipo cada día. La resina epoxi fresca se puede limpiar con una brocha o trapo mojado con disolvente.

- **Eliminación**

Las resinas una vez endurecidas solo pueden ser eliminadas mediante medios mecánicos. Las herramientas se limpiarán inmediatamente después de su uso con un limpiador a base de disolventes.

Si sobra resina sin curar pero mezclada en los recipientes al final del día, colocar sobre una lámina de polietileno delgada sobre el suelo para que cure en pequeña proporción y no genere exceso de calor, o pasarla a recipientes más pequeños.

6.4.4 - Preparación de la superficie

Las superficies a tratar se presentarán de tal manera que en el momento de ejecutar los trabajos de refuerzo, estén en perfectas condiciones, para lo cual se eliminarán las lechadas superficiales, manchas, suciedad, partes mal adheridas, restos de otros oficios, armaduras expuestas o con síntomas de corrosión.etc., y la superficie seca.

Las superficies de hormigón se prepararán mediante medios mecánicos, como son chorro de arena, chorro de agua a alta presión, chorro mixto, o mediante repicado, cincelado, escarificado, abujardado.

-Chorro de arena

Es la más indicada para este tipo de trabajos. Consiste en proyectar sobre el soporte un chorro de arena de sílice mediante un compresor de caudal variable en función de la distancia al soporte, con una presión de 7 atm aproximadamente. La granulometría de la arena estará comprendida entre 1 y 2 mm y el operario que realice el trabajo actuará provisto de una escafandra protectora ventilada con aire fresco.

-Agua a alta presión

Consiste en proyectar sobre el soporte agua con una presión mínima de 150 atm, mediante un equipo especial, a través de una lanzadera provista de una boquilla adecuada y con una presión en bomba controlada con un manómetro.

-Chorro de agua-arena

Sistema combinación de los otros mencionados, en el que se utiliza básicamente el equipo de chorro de agua a alta presión y una lanza de proyección con un dispositivo que permite incorporar la arena de sílice en la boquilla (Efecto Venturi).

Todas las superficies se deben repasar con el compresor de aire limpio y aspirar para eliminar todo el resto de polvo. Las fisuras existentes en el hormigón con ancho 0'25 mm se inyectarán previamente con una resina de baja viscosidad, base epoxi.

Las esquinas se redondearán con un radio de curvatura mínimo de 20 mm o según venga especificado en el proyecto. Esto se puede realizar mediante una radial desbastando la superficie o mediante morteros reparadores, construyendo dicha forma redonda.

Según las recomendaciones, la superficie que se va a reforzar tiene que estar nivelada con resaltos y oquedades menores de 0,5 mm. Se debe comprobar la planeidad y nivelación de la superficie con una regla. Para regla de 2 m, la tolerancia máxima es de 4 mm y para regla de 0,3 m de longitud 2 mm, pero nunca mayores de 0,5 mm para marcas de encofrado o pequeños escalones. Las tolerancias serán más restrictivas si la normativa local lo exige. Para la reparación o eliminación de las irregularidades se procederá a la aplicación de morteros de reparación, seleccionando el tipo de mortero a aplicar en función del espesor de las irregularidades, según sea superior o inferior a 5 mm.



Figura 6.17 Preparación de la superficie mediante abujardado mecánico

6.4.5 - Resina. Mezclado

Para su aplicación, mezclar los dos componentes, A y B, con una batidora eléctrica de baja velocidad (máx. 600 r.p.m) al menos durante tres minutos, hasta conseguir una mezcla totalmente homogénea. Verter la mezcla en un recipiente limpio y batir nuevamente durante 1 minuto aproximadamente. Es importante respetar los tiempos de mezclado para el correcto endurecimiento de la resina.

Proporción de la mezcla A:B = 4:1 en peso. Generalmente el soporte suele estar fino, la limpieza con chorro abrasivo lo deja ligeramente rugoso. Esto influirá en el consumo de la resina. La resina se puede utilizar tanto como imprimación del soporte como impregnación del tejido.



Figura 6.18 Aspecto de la mezcla homogénea

6.4.6 - Aplicación del refuerzo de CFRP

Evitar aplicar una fuerza excesiva al pasar o al retroceder el rodillo sobre el tejido para evitar doblarlo o arrugarlo.

Se debe realizar un solape en la dirección de la fibra de al menos 100 mm (de acuerdo al tipo de tejido) o de las especificaciones del proyecto.



Figura 6.19 Detalle del solape en la dirección de las fibras

Lado a lado:

Tejidos unidireccionales: cuando se coloquen varios tejidos unidireccionales, uno al lado del otro, no se necesita solape, a menos que venga especificado en el proyecto de refuerzo.

Tejidos multi-direccionales: el solape en sentido perpendicular debe ser al menos de 100 mm (de acuerdo al tipo de tejido) o de las especificaciones del proyecto.

6.4.7 - Método seco

En el método seco, el tejido se coloca directamente sobre el adhesivo de viscosidad media aplicado previamente sobre la superficie de hormigón a reforzar.

- Aplicación imprimación/resina

Puesto que la resina sirve tanto como imprimación como impregnador del tejido a la misma vez, nos ahorramos un paso que el método húmedo.

Es decir, una vez mezclada correctamente la resina, la aplicamos sobre el soporte mediante el uso de una paleta, rodillo o brocha, en una cantidad aproximada de 0,5 a 1 Kg/m², dependiendo de la rugosidad del soporte.

- **Colocación del tejido**

La aplicación del tejido sobre la resina se debe realizar fresco sobre fresco, por lo que hay que prestar especial atención en el tiempo abierto de la resina, siguiendo las recomendaciones del fabricante.

Colocar el tejido sobre la resina en la dirección adecuada, embebiendo el tejido en la misma, presionando con un rodillo especial para impregnación solo en la dirección de las fibras, hasta que la resina salga por los huecos del tejido.



Figura 6.20 Colocación del tejido y su impregnación en la resina

- **Capas adicionales de tejido**

La aplicación de capas adicionales se debe realizar fresco sobre fresco.

A bajas temperaturas y/o alta humedad relativa, la superficie de la resina curada se puede volver pegajosa. Antes de aplicar otra capa adicional de tejido, o un recubrimiento, sobre esta superficie se debe eliminar esta capa con esponja saturada en agua y aclarar con abundante agua. Para ambos casos, se debe limpiar la superficie de esta manera antes de la aplicación de la siguiente capa o recubrimiento.

La cantidad adicional de resina a aplicar para colocar la siguiente capa dependerá del tipo de tejido (del gramaje).

Para colocar capas adicionales de tejido de fibras, aplicar una nueva capa de resina dentro de los 60 minutos (a 23 °C) después de la aplicación de las capas previas y repetir el procedimiento de la laminación. Si esto no fuera posible, se deberá esperar al menos 12 horas antes de la aplicación de la siguiente capa.

Los solapes de las capas adicionales se deben distribuir a lo largo de la sección, de manera que no coincidan.

- Preparación para el recubrimiento del tejido

A bajas temperaturas y/o alta humedad relativa, la superficie de la resina curada se puede volver pegajosa. Antes de aplicar otra capa adicional de tejido, o un recubrimiento, sobre esta superficie se debe eliminar esta capa con esponja saturada en agua y aclarar con abundante agua. Para ambos casos, se debe limpiar la superficie de esta manera antes de la aplicación de la siguiente capa o recubrimiento.

Si se desea aplicar un recubrimiento cementoso sobre el tejido de fibras, se debe aplicar una capa adicional de resina de aproximadamente 0'5 Kg/m². Y en fresco espolvorear arena de cuarzo, que actuará como superficie de agarre para el recubrimiento posterior.

Si se va a recubrir con una pintura, la superficie fresca de la resina se puede alisar con una brocha.



Figura 6.21 Espolvoreado de arena de cuarzo y revestimiento del refuerzo

6.4.8 - Método húmedo

En este método, el tejido se impregna con la resina, bien con un saturador mecánico, o bien manualmente sobre una mesa de trabajo, y se aplica húmedo sobre el soporte también imprimado. Este método está especialmente indicado para tejidos con gramajes mayores de 300 g/m².

Se deben seguir las recomendaciones del fabricante con respecto a lo tiempo abierto de la resina, para los diferentes pasos de aplicación.

- **Aplicación imprimación**

Se debe imprimir el soporte previamente con resina epoxídica, usando un rodillo o brocha. Si es necesario, aplicar una segunda capa de la resina de imprimación, después de que la primera capa haya penetrado en el hormigón.

- **Aplicación de la resina**

El consumo de la resina estará aproximadamente entre 0'4 – 1'0 Kg/m², dependiendo del tipo de tejido.

- **Manual**

Distribuir 2/3 del consumo de resina esperado sobre una lamina de polietileno (o algún material no absorbente) y colocar el tejido, ya cortado en sus dimensiones correspondientes, sobre ella. Saturar el tejido en resina pasando un rodillo en la dirección de las fibras. Distribuir el tercio restante de la resina epoxi sobre el tejido y volver a pasar el rodillo por encima.

El consumo de la resina se puede comprobar pesando el tejido antes y después de la impregnación.

Para facilitar la aplicación del tejido sobre el soporte y a la vez escurrir el exceso de resina del tejido, se enrolla el tejido en dos listones de madera.



Figura 6.22 Impregnación del tejido en resina y enrollado en los listones de madera

- **Mecánicamente con el saturador**

El equipo debe estar situado en un área bien ventilada e iluminada.

El montaje del saturador se debe supervisar y chequear por la persona correspondiente según las indicaciones del fabricante.

Seguir las instrucciones del fabricante para el correcto montaje y calibración del mecanismo. Los rodillos se deben calibrar para la saturación del tejido con el correcto consumo de resina.

Procedimiento de saturación:

Ajustar las piezas de plástico blancas para el ancho de tejido correspondiente.

Ajustar el ancho adecuado entre rodillos para el tejido correspondiente.

El ancho entre rodillos se debe chequear al comienzo de cada día por el técnico cualificado para asegurarse de que no se ha cambiado la posición de los rodillos durante el uso.

Es importante determinar el ancho entre rodillos. Una abertura demasiado estrecha (ancho entre rodillos) puede romper el tejido y una abertura demasiado ancha dejará el tejido totalmente empapado.

Las variaciones grandes de temperatura afectarán a la viscosidad de la resina y por consiguiente a la abertura entre rodillos. Procedimiento para la saturación con resina epoxi:

- Tener las fibras precortadas o el rollo en el saturador.
- Mojar los rollos vertiendo la resina epoxídica en el centro de los rodillos, mientras se hacen rotar lentamente. Pasar las fibras sobre la barra superior entre el dosificador y entre los rodillos.
- Hacer rotar lenta y continuamente los rodillos del saturador.
- Si el tejido no está ya cortado, cortarlo una vez esté impregnado de resina con unas tijeras, y enrollarlo para su fácil manejo y colocación. Prestar especial cuidado para no dañar el tejido.
- Quitar el rodillo (tubo de plástico) que contiene el tejido saturado.
- Desenrollar gradualmente el tejido del tubo de plástico junto al soporte.



Figura 6.23 Impregnación del tejido mediante el saturador

- Colocación del tejido

Colocar el tejido ya saturado sobre el soporte imprimado, todavía húmedo, en la dirección requerida y estirar con la mano hasta eliminar pliegues y crestas. Después del alisado y la colocación, el tejido se debe laminar sobre el soporte utilizando un rodillo impregnador de plástico. Pasar el rodillo sobre el tejido paralelo a la dirección de las fibras hasta que la resina se distribuya uniformemente sobre el tejido y se elimine el aire ocluido. Evitar hacer excesiva fuerza para no provocar pliegues y crestas del tejido.



Figura 6.24 Colocación del tejido en el soporte

Si se requieren capas adicionales se repetirá el proceso de impregnación y laminación.

Aplicar una capa de sellado de resina con un consumo aproximado de 0'3 Kg/m² y espolvoreado de arena de cuarzo mientras esté húmedo para conseguir una superficie rugosa para el siguiente recubrimiento.

- Capas adicionales de tejido

Debido al peso de estos tejidos (del método húmedo), se recomienda realizar las capas adicionales con un tiempo de espera mínimo de 12 horas (a 23 °C), de esta manera se evita el desplazar el tejido de la capa previa de su posición.

La cantidad adicional de resina adhesiva a aplicar la siguiente capa dependerá del tipo de tejido.

Para la colocación de las capas adicionales, repetir el proceso de laminación. Se recomienda seguir las instrucciones del fabricante con respecto al tiempo abierto de la resina.

Los solapes de las capas adicionales se deben distribuir a lo largo de la sección, de manera que no coincidan.

- Preparación para el recubrimiento cementoso del tejido

Si se desea aplicar un recubrimiento cementoso sobre el tejido se debe aplicar una capa adicional de resina de aproximadamente 0'3 Kg/m². En fresco, espolvorear arena de cuarzo, que actuará como superficie de agarre para el recubrimiento posterior.

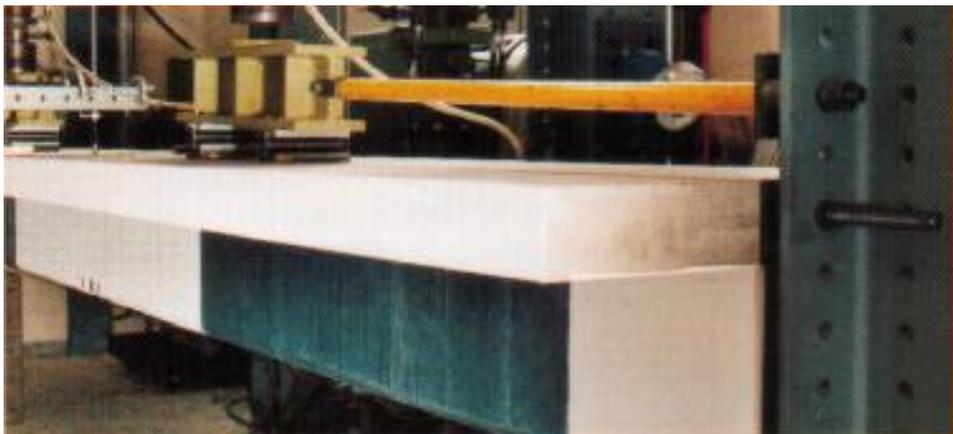


Figura 6.25 Ensayo de viga en T reforzada con tejido en el alma

6.4.9 - Recubrimiento con pintura

Este punto es igual para el método seco como para el método húmedo (manual y saturador).

El tejido aplicado y curado puede ser revestido con pinturas por motivos estéticos o de protección. La selección dependerá de los requerimientos a cumplir.

Se recomienda seguir las instrucciones del fabricante con respecto a los tiempos de espera antes del revestimiento.

6.4.10 - Curado

Proteger el tejido colocado de la lluvia, arena, polvo y otros contaminantes durante al menos 24 horas después de la aplicación.

6.4.11 - Inspección

- Inspección en obra

La dirección facultativa observará continuamente todos los aspectos de preparación, mezclado y aplicación de los materiales, incluido lo siguiente:

- Preparación de la superficie.
- Las etiquetas del envase del material.
- El mezclado de la resina.
- La aplicación de la resina de las fibras.
- El curado del material compuesto.
- Toma de muestras.
- Todos los aspectos relacionados con el refuerzo mediante materiales compuestos, FRP.

Para completar el proceso de curado del sistema instalado se comprobarán las áreas donde la resina de impregnación no haya penetrado o donde la resina no haya curado completamente. Si tales áreas cubren más de 25 x 25 mm del área de la superficie, se inyectará resina para restablecer la adherencia para las especificaciones y aprobación del ingeniero proyectista.

Todas las reparaciones estarán sometidas a la misma aplicación, curado y especificaciones de control de calidad como en los trabajos originales. Se recomiendan los siguientes tipos de reparación:

- Para pequeñas deslaminaciones y burbujas, inyectar con un sistema epoxi compatible.

- Si los defectos son grandes, puede ser necesaria la aplicación de capas adicionales de refuerzo mediante FRP. La preparación de los trabajos, número de capas adicionales y la longitud de solape deben ser especificadas por el ingeniero.

- Toma de muestras y ensayos

El procedimiento de toma de muestras del tejido será el siguiente, según se requiera por las especificaciones de trabajo:

- Apuntar el número de lote de tejidos usados.
- Se utilizarán los mismos lotes de los componentes de la resina al tiempo que se vayan necesitando.
- Tamaño de muestra: 30 x 30 cm o como se requiera.
- Tejido saturado.
- Sobre una superficie nivelada y fina, cubierta por una lámina de polietileno de 0'5 mm de espesor, colocar el número de capas de tejido en la misma dirección.
- Curar las muestras y no mover durante 48 horas después de la aplicación.

Enviar las muestras seleccionadas por el ingeniero a un laboratorio cualificado. El laboratorio debe entregar los resultados como máximo en diez días. Las muestras preparadas, identificadas deben ser ensayadas aleatoriamente según los requisitos del ingeniero o la propiedad. Los ensayos consistirán en, al menos, lo siguiente:

- Resistencia última a tracción.
- Módulo de elasticidad.
- Alargamiento a rotura.

6.5 - CONTROL DE CALIDAD

6.5.1 - Objeto

El objeto del presente plan de calidad, es el de establecer unos criterios de recepción, manipulación y aplicación de los productos, acorde con la especialización requerida por los trabajos, y garantizando la realización de los mismos.

Para la aplicación de cada uno de los productos que intervienen en el sistema es preciso consultar sus fichas técnicas correspondientes. Se recomienda la utilización de personal especializado para la realización de estas operaciones, siguiendo siempre las instrucciones específicas de la empresa que comercializa el producto.

No se incluyen en este plan consideraciones respecto a la idoneidad del sistema o de la cantidad de fibra empleada, que habrán sido establecidas previamente en la fase de proyecto.

6.5.2 - Consideraciones previas

La dirección facultativa comprobará que el personal de la empresa aplicadora ha sido adecuadamente formado y entrenado en la aplicación de refuerzos con fibra de carbono en general y en aplicación de resinas sintéticas en particular.

La dirección de la empresa aplicadora designará un responsable técnico de los trabajos, convenientemente especializado, el cual se responsabilizará del cumplimiento del plan de calidad.

Se establecerá un método de toma de datos de fácil cumplimentación para que el responsable técnico de los trabajos designado por la empresa aplicadora pueda recoger los mismos de forma cómoda.

Los adhesivos y fibras de carbono empleados deben ser caracterizados según los métodos standard de ensayo. Las propiedades deben ser entregadas por el fabricante, que debe ser capaz de justificar que los ensayos han sido realizados por un laboratorio independiente. Además, el fabricante debe garantizar que existe un control de calidad durante la producción.

Si es posible, la caracterización de los materiales, acordes con los ensayos y acreditados por laboratorio externo, debe ser supervisada por un organismo de certificación. De este modo, los productos pueden ser certificados.

Toda la documentación y registros derivados de los trabajos de refuerzo se mantendrán archivados permanentemente con objeto de permitir la trazabilidad.

6.5.3 - Control de recepción de materiales

Se solicitará y a la empresa fabricante y/o suministradora de los diferentes componentes del sistema la siguiente documentación:

- Copia de la certificación según ISO 9000.
- Copia de los ensayos de control de calidad de las partidas suministradas en la obra de cada uno de los materiales.

A la llegada del material a la obra se comprobarán y anotarán (aceptación o rechazo) los siguientes aspectos:

- Cómputo de las cantidades recibidas.

- Resinas:

- Comprobación de la denominación de los mismos y de la correcta identificación de la totalidad de envases.

- Comprobación de la fecha límite de uso de los materiales que deberá estar claramente indicada en cada uno de los envases.

- Inspección visual del estado de los envases descartando aquellos que presenten roturas con pérdida de material.

- **Hojas de fibra:**

- Comprobación de la identificación de la fibra (tipo, gramaje, etc) y de las dimensiones de los rollos.

- Inspección visual del estado comprobando que no existe daño ni desmadejamiento de la fibra.

- **Laminados:**

- Inspección visual de la fibra comprobando que los laminados no sufren delaminaciones ni fisuras.

- Comprobación de dimensiones.

6.5.4 - Control de los acopios

Se comprobará que los materiales se almacenan agrupados según su identificación, a cubierto (protegidos del sol y de fuentes de calor) en lugar fresco y seco y en sus envases originales cerrados. Los materiales hidráulicos (si los hubiere) se acopiarán separados del terreno mediante listones de madera y protegidos de la lluvia y el rocío.

No se extraerán los envases de las cajas de envío hasta el momento de su empleo.

Al final de la jornada se realizará un cómputo del material acopiado, a fin de comprobar los materiales consumidos durante la jornada. Se asegurará especialmente la concordancia entre el número de componentes A y B para los materiales bicomponentes.

6.5.5 - Control de ejecución

- **Preparación del soporte**

Antes del inicio de los trabajos, se personará en obra personal cualificado de empresa manufacturera o la empresa aplicadora, a fin de determinar la idoneidad del estado de la superficie sobre la que se aplicará el refuerzo. Se evaluarán las siguientes características:

- Saneado del elemento a reparar. Se controlará la no existencia de manchas, restos de pinturas antiguas o lechadas antiguas y que la superficie de hormigón está limpia, firme y rugosa.

En caso de ser necesario, se redondearán las aristas con un radio mínimo de 10 mm.

- Contenido de humedad. La humedad residual del soporte será inferior al 4%. En caso de existir dudas sobre este valor, se realizarán determinaciones del contenido de humedad mediante aparatos certificados.
- Temperatura del soporte. Se comprobará que en el momento de la aplicación, la temperatura del soporte se encuentre por encima de +5°C.
- Resistencia a tracción mínima del soporte. Se comprobará que el soporte posee una resistencia mínima a tracción de 1,5 N/mm² para el caso de refuerzo con laminado y 1,0 N/mm² para el caso de refuerzo con tejido de fibra.

Se realizará al menos una determinación de la resistencia a tracción del hormigón por cada 200 metros (lineales o cuadrados) de refuerzo a aplicar.

Se debe realizar los ensayos de resistencia mecánica del hormigón para asegurar la calidad del soporte. La resistencia al arrancamiento del adhesivo sobre la superficie de hormigón tratado debe ser mayor de 2'0 N/mm² en vigas y forjados, y mínimo 1'5 N/mm² para confinado de pilares.

- Planimetría. Se verificará que se cumplen las siguientes condiciones de planimetría:

Tipo de Refuerzo	Irregularidad (mm) permisible en 2,00 m	Irregularidad (mm) permisible en 0,30 m
Laminado	10	4
Tejido	4	2

Tabla 6.26 Condiciones de planimetría

- **Instalación del laminado**

Imprimación:

- Comprobación de la temperatura (superior a +5°C) y la humedad del soporte (inferior al 4%).
- Mezclado: se establecerá un tiempo mínimo de 3 minutos. Se realizará siempre con medios mecánicos.
- Utilización de útiles recomendados para el material.
- Se realizará el control de la cantidad de material aplicado. En ningún caso será inferior a 300 g/m² en superficies de hormigón.
- No se aceptará la realización de mezclas parciales.
- Caso de sobrepasarse los tiempos máximos de aplicación de los productos, se procederá a la aplicación de una nueva capa de material.

Adhesivo:

- Comprobación de la temperatura (superior a +5°C) y la humedad del soporte (inferior al 4%)
- Establecimiento del tiempo mínimo de espera de 90 minutos desde la aplicación de la imprimación y del máximo de 48 horas.
- Comprobación de la limpieza con disolvente libre de grasas del laminado (en la cara que no está marcada)
- Comprobación de cantidad de material aplicado sobre el laminado (siempre inferior a 2 mm)
- Comprobación de la cantidad de material aplicado sobre el soporte (1-2 mm)
- Comprobación del rebose del material por todo el perímetro del laminado.
- Comprobación de la utilización de los útiles recomendados.
- No se aceptará la realización de mezclas parciales.
- Caso de sobrepasarse los tiempos máximos de los productos, se procederá a la aplicación de una nueva capa de material.

- Instalación del tejido

Imprimación

- Comprobación de la temperatura (superior a +5°C) y la humedad del soporte (inferior al 4%).
- Mezclado: se establecerá un tiempo mínimo de 3 minutos. Se realizará siempre con medios mecánicos.
- Utilización de útiles recomendados para el material.
- Se realizará el control de la cantidad de material aplicado. En ningún caso será inferior a 300 g/m² en superficies de hormigón y 180 g/m² en superficies metálicas.
- No se aceptará la realización de mezclas parciales.
- Caso de sobrepasarse los tiempos máximos de los productos, se procederá a la aplicación de una nueva capa de material.

Adhesivo impregnación:

- Utilización de los útiles recomendados (llana, rastrillo de goma, rodillo...)
- Comprobación de la aplicación del adhesivo (entre 0,5 y 48 horas después de la imprimación).

- Comprobación de la aplicación de la segunda capa de adhesivo (entre 0,5 y 48 horas desde la aplicación de la primera capa)
- Comprobación de la visibilidad de las fibras negras de la hoja de fibra.
- Comprobación de la cantidad de material aplicado. En ningún caso será inferior a 650 gr/m².
- No se aceptará la realización de mezclas parciales.
- Caso de sobrepasarse los tiempos máximos de los productos, se procederá a la aplicación de una nueva capa de material.

Tejido de fibras

- Se comprobará la colocación de la fibra estando aún fresco el adhesivo.
- Se comprobarán las longitudes de solapes (mínimo 10 cm)
- Se comprobará la longitud del soporte de papel de la parte posterior de la hoja de fibra retirado.

6.5.6 - Control final de obra

El control de calidad previo, durante y posterior a la ejecución del refuerzo se puede realizar mediante Ensayos No Destructivos y Ensayos Parcialmente Destructivos.

Ensayos parcialmente destructivos

- Ensayo de adherencia por tracción directa (pull-off)

Normativa vigente para el ensayo por tracción directa UNE EN 1542-2000: "Productos y sistemas para la protección y preparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayos. Determinación de la adhesión por tracción directa". El ensayo de arrancamiento se realizará antes del inicio de los trabajos, junto con la toma de datos para el cálculo del refuerzo en función de las propiedades del soporte de hormigón. Se realiza de la siguiente manera:

Se realiza una perforación superficial, sobre la superficie a realizar el ensayo, con una profundidad de 5-10 mm, por medio de una taladradora eléctrica con una corona de carburo de tungsteno o una barrena tubular con corona de diamante. El diámetro será de 50 mm.

La superficie de la sufridera de metal tiene que estar lijada, limpia y libre de grasa. El diámetro de las sufrideras será de 50 mm.

Aplicar un sistema para la fijación de anclajes compuesto por una resina epoxi de dos componentes libre de disolventes en la superficie de hormigón y en la cara de la sufridera, y se adhiere al hormigón permitiendo que cure el adhesivo. Una vez

curada la resina, fijar el equipo de medición a la sufridera y se procede al arrancamiento para obtener las medidas de la resistencia del hormigón, tal y como indica el procedimiento del ensayo según la norma citada anteriormente.



Figura 6.27 Pegado y ensayo de arrancamiento posterior al curado de las sufrideras al soporte

- **Ensayo de adherencia a cortante**

Si en el refuerzo, el laminado de CFRP ha sido adherido a la superficie de hormigón cercana a un borde y prolongada desde él, esta parte extendida del laminado puede ser sujeta y sometida a tensión hasta la rotura en la interfase hormigón-laminado. En este tipo de ensayo, la interfase del adhesivo está sometida a cortante puro.

- **Ensayo de adherencia a torsión**

Un disco en forma de anillo se adhiere sobre la superficie del refuerzo de CFRP y se realiza una perforación de los diámetros exterior e interior con una profundidad de 5 mm en el hormigón. Después del endurecimiento, el disco se desenrosca. En este tipo de ensayo, la interfase del adhesivo está sometida a torsión.

- **Ensayo de adherencia (pull-out)**

Durante la ejecución del refuerzo se realizarán muestras de sacrificio en zonas contiguas a las del refuerzo aplicado con objeto de realizar ensayos representativos de adherencia sin dañar el refuerzo.

Estas muestras consistirán en tiras de 20 cm de laminado o de hoja de fibra instaladas sobre una zona de soporte contigua y con las mismas características y tratamiento que el destinado a recibir el refuerzo, empleando porciones de mezclas de resina preparadas para la instalación del refuerzo.

Sobre estas muestras de sacrificio se realizarán ensayos de adherencia a razón de al menos:

- Una determinación por cada 100 ml de laminado
- Una determinación por cada 100 m² de refuerzo con hoja de fibra.
- No menos de una determinación por obra y tipo de refuerzo (laminado u hoja de fibra).

Deberán obtenerse valores de rotura por lo menos de 1,5 N/mm² y puntos de rotura homogéneos y al menos 90% dentro del soporte.

Ensayos no destructivos

- Ensayo de adherencia (tap-test)

Se comprobará mediante golpeteo continuado la presencia de zonas huecas (sonido sordo al impacto) con una barra de acero de 5 mm de diámetro y punta redondeada. Se señalarán las zonas afectadas.

En caso de apreciarse zonas con faltas de adherencia en laminados, deberán repararse por inyección o en caso necesario repetirse el proceso de instalación.

En caso de apreciarse zonas con fallos de adherencia en la instalación de hojas de fibra se aplicarán los siguientes criterios:

- Inferiores a 12 cm² serán permisibles y no se repararán si:
 - Área afectada es inferior al 5% del total.
 - La distribución no supera las 10 por m².
- Hasta 160 cm² podrán repararse por inyección de resina.
- Más de 160 cm² deberán cortarse y repararse.

- Ensayo de eco mediante ultrasonido

Una onda de ultrasonidos de alta frecuencia se utiliza para escanear la interfase entre hormigón y refuerzo CFRP y detectar defectos de adherencia a través de ecos generados por desajustes de impedancia acústica.

La efectividad de esta técnica está limitada a defectos como burbujas de aire o gas, requiere de personal muy experimentado. Las áreas de refuerzo CFRP próximas a bordes o con radios de curvatura muy pequeños no pueden ser ensayados con éxito con esta técnica. Desde su uso, sí está muy recomendada únicamente para las áreas de refuerzo donde la unión de los elementos es crítica.

- **Ensayo de ultrasonido transparente**

Una onda de ultrasonidos de baja frecuencia se utiliza para escanear direcciones ortogonales a la superficie reforzada donde uno de los transductores está ubicado, mientras otro transductor está ubicado en la cara opuesta del elemento de hormigón. Se graban el tiempo de recorrido de la onda a través de la masa y la atenuación de la misma. Esta técnica sólo es posible cuando ambas caras del elemento, la reforzada y la opuesta, son fácilmente accesibles sin excesiva pérdida de tiempo. Su uso sólo es recomendado en situaciones concretas.

- **Termografía**

La termografía no destructiva ha sido aplicada exitosamente en la evaluación de la adherencia. El ensayo debe realizarse con la muestra en equilibrio térmico, aplicando un constante calor (o frío) a la superficie del refuerzo CFRP y grabando la temperatura de la superficie mediante un sistema de infrarrojos. Los defectos son localizados como puntos de calor (o frío) debido a las propiedades térmicas diferentes del adhesivo degradado. Aunque es una técnica muy recomendada, requiere mucha atención y cuidado en el cálculo de los defectos detectables más pequeños a fin de garantizar su estado y propagación.

- **Pruebas de carga**

Para la puesta en servicio hay que tener en cuenta que, el adhesivo va adquiriendo sus resistencias desde el momento en que es colocado hasta conseguir el endurecimiento total a los 7 días. Por lo tanto es necesario esperar 7 días hasta sobrecargar el elemento estructural a su carga máxima, pudiendo cargarse previamente con sobrecargas inferiores que no hagan superar el límite de resistencia del adhesivo en cada momento.

- **Control de envases**

Antes de la retirada de obra de los envases utilizados, se procederá a su inspección, en la que se observará:

- Concordancia en número de envases utilizados de materiales bicomponentes.
- Ausencia de restos significativos de material en los envases bicomponentes.
- Endurecimiento total del material mezclado restante en los envases.

6.5.7 - Tablas de comprobación en obra

Durante la realización de los trabajos de refuerzos de estructuras con el sistema de refuerzo CFRP, se realizará el control de las características y actuaciones

especificadas, cumplimentándose los apartados de las tablas ejemplo que se muestran a continuación.

RECEPCIÓN Y ACOPIOS	EVALUACIÓN	
	Especificación	Valor
RECEPCIÓN		
Identificación de envases	Correcta en todos	
Estado de envases	Completo sin pérdidas	
Fecha límite de uso de los productos	Mínimo 1 mes extra	
Identificación de la fibra	Correcta en todos	
Estado de la fibra	Sin daños	
Dimensiones de los laminados	Según especificación	
Estado de los laminados	Nominal ± 1 mm	
ACOPIOS		
Agrupación	Según identificación	
Localización del acopio	A cubierto	

PREPARACIÓN DEL SOPORTE	EVALUACIÓN	
	Especificación	Valor
Presencia de pinturas, manchas o lechadas	Sin restos	
Rugosidad de la superficie	0,5 mm	
Planimetría del laminado	10 mm (regla 2,00 m)	
Planimetría del laminado	4 mm (regla 0,30 m)	
Planimetría del tejido	4 mm (regla 2,00 m)	
Planimetría del tejido	2 mm (regla 0,30 m)	
Redondeado de aristas	Mínimo radio de 20 mm	

PREPARACIÓN DEL SOPORTE	EVALUACIÓN	
	Especificación	Valor
Temperatura del soporte	Mínimo + 5°C	
Contenido en humedad del soporte	Máximo 4%	
Resistencia a tracción del soporte	Laminado	Mínimo 1 N/mm ²
	Tejido	Mínimo 1,5 N/mm ²

APLICACIÓN DEL REFUERZO LAMINADO	EVALUACIÓN	
	Especificación	Valor
IMPRIMACIÓN		
Tª del soporte en el momento de aplicación	Mínimo + 5°C	
Tª ambiental en el momento de aplicación	Mínimo + 10°C	
Tiempo de mezclado	Mínimo 3 min.	
Útiles empleados	Brocha o rodillo	
Consumo medio	Mínimo 300 g/m ²	
ADHESIVO		
Tª del soporte en el momento de aplicación	Mínimo + 5°C	
Tª ambiental en el momento de aplicación	Mínimo + 10°C	
Tiempo de mezclado	Mínimo 3 min.	
Útiles empleados	Espátula cóncava	
Intervalo de la aplicación de la imprimación	Entre 0,5 y 48 h.	
Aplicación sobre el soporte	Si	
Aplicación sobre el laminado	Si	
Espesor aplicado	Máximo 3 mm	
LAMINADO		
Limpieza con disolvente exento de grasas	Si	
Orientación	Adherencia por cara rugosa	
Material aplicado rebosa por el perímetro	Si	

APLICACIÓN DEL TEJIDO DE FIBRAS	EVALUACIÓN	
	Especificación	Valor
IMPRIMACIÓN		
Tª del soporte en el momento de aplicación	Mínimo + 5°C	
Tª ambiental en el momento de aplicación	Mínimo + 10°C	
Tiempo de mezclado	Mínimo 3 min.	
Útiles empleados	Brocha o rodillo	
Consumo medio	Mínimo 300 g/m ²	
ADHESIVO / SATURANTE		
Tª del soporte en el momento de aplicación	Mínimo + 5°C	
Tª ambiental en el momento de aplicación	Mínimo + 10°C	
Tiempo de mezclado	Mínimo 3 min.	
Útiles empleados	Brocha o rodillo	
Intervalo de la aplicación de la imprimación	Entre 0,5 y 48 h.	
Intervalo de capas	30 min. aprox	
Consumo medio	Mínimo 650 g/m ²	
TEJIDO DE FIBRA		
Visibilidad de la fibra	Si	
Longitud de solapes longitudinales	Mínimo 10 cm	
Longitud de solapes transversales	0 cm	

CONTROL DE MATERIALES Y CONSUMOS: INSTALACIÓN DEL LAMINADO				
	Fecha de Recepción	Cantidad Recepcionada		
Imprimación, Componente A				
Imprimación, Componente B				
Adhesivo, Componente A				
Adhesivo, Componente B				
Laminado				
CONTROL DE ACOPIOS	Fecha de aplicación 1	Fecha de aplicación 2	Fecha de aplicación 3	Fecha de aplicación 4
Imprimación, Componente A				
Imprimación, Componente B				
Adhesivo, Componente A				
Adhesivo, Componente B				
Laminado				
CONTROL DE CONSUMOS	Fecha de aplicación 1	Cantidad aplicada	Superficie tratada	Consumo
Imprimación				
Adhesivo				
Laminado				
CONTROL DE CONSUMOS	Fecha de aplicación 2	Cantidad aplicada	Superficie tratada	Consumo
Imprimación				
Adhesivo				
Laminado				
CONTROL DE CONSUMOS	Fecha de aplicación 3	Cantidad aplicada	Superficie tratada	Consumo
Imprimación				
Adhesivo				
Laminado				
CONTROL DE CONSUMOS	Fecha de aplicación 4	Cantidad aplicada	Superficie tratada	Consumo
Imprimación				
Adhesivo				
Laminado				

CONTROL DE MATERIALES Y CONSUMOS: INSTALACIÓN DEL TEJIDO				
	Fecha de Recepción	Cantidad Recepcionada		
Imprimación, Componente A				
Imprimación, Componente B				
Adhesivo, Componente A				
Adhesivo, Componente B				
Tejido				
CONTROL DE ACOPIOS	Fecha de aplicación 1	Fecha de aplicación 2	Fecha de aplicación 3	Fecha de aplicación 4
Imprimación, Componente A				
Imprimación, Componente B				
Adhesivo, Componente A				
Adhesivo, Componente B				
Tejido				
CONTROL DE CONSUMOS	Fecha de aplicación 1	Cantidad aplicada	Superficie tratada	Consumo
Imprimación				
Adhesivo				
Tejido				
CONTROL DE CONSUMOS	Fecha de aplicación 2	Cantidad aplicada	Superficie tratada	Consumo
Imprimación				
Adhesivo				
Tejido				
CONTROL DE CONSUMOS	Fecha de aplicación 3	Cantidad aplicada	Superficie tratada	Consumo
Imprimación				
Adhesivo				
Tejido				
CONTROL DE CONSUMOS	Fecha de aplicación 4	Cantidad aplicada	Superficie tratada	Consumo
Imprimación				
Adhesivo				
Tejido				

CAPÍTULO 7

APLICACIÓN DE LAS GUÍAS DE DISEÑO PARA EL CÁLCULO DE UN REFUERZO A FLEXIÓN EN VIGA

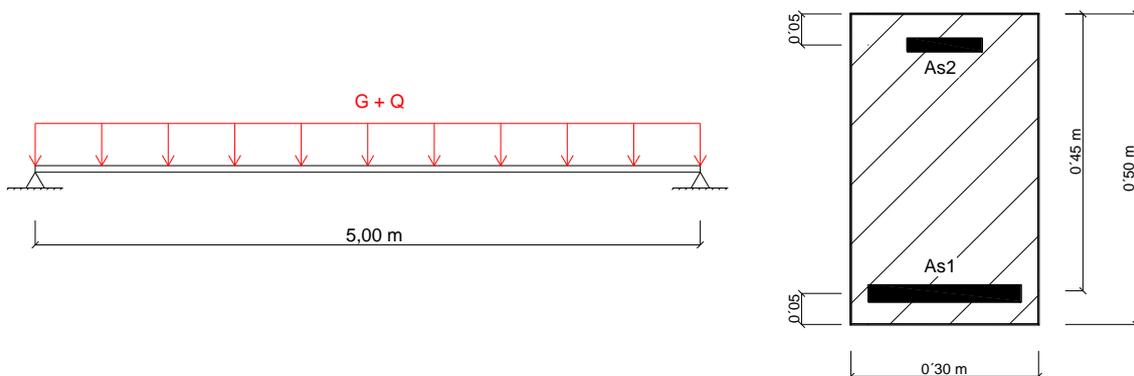
7.1 - PLANTEAMIENTO DEL CASO PRÁCTICO

En este apartado vamos a plantear un caso práctico para el diseño del refuerzo mediante sistema de FRP de una viga a flexión. El cálculo del refuerzo se va a centrar expresamente en el desarrollo del procedimiento de trabajo para cumplir la resistencia requerida por la viga sometida a esfuerzos de flexión. Para ello, utilizaremos las dos guías de diseño que ya hemos estudiado, ACI 440 (*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures – American Concrete Institute*) y Bulletin 14 de FIB (*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures – Fédération Internationale du Béton*) y representaremos ambos procedimientos con un análisis paso a paso de los requerimientos exigidos en cada uno de ellos, un comparativo de ambos procedimientos y unas conclusiones finales en base a los resultados (observe que en cada procedimiento se utiliza la nomenclatura propia de cada guía).

Vamos a estudiar el caso práctico de una viga de hormigón armado de sección rectangular, 30x50 cm, y 5'00 m. de luz, sometida a unas cargas uniformemente distribuidas permanentes, incluida la propia, ($G= 20 \text{ KN/m}$) y variables ($Q=15 \text{ KN/m}$). Se trata de una viga biapoyada ubicada en el interior de un edificio. A partir de un proyecto de cambio de uso en el edificio, se ha calculado que las cargas variables que actúan sobre la viga aumentan en un 50% las anteriores. Nuestro trabajo consiste en comprobar si la resistencia de la viga puede soportar este incremento de cargas o, por el contrario, necesitamos reforzar la viga a flexión. En caso de reforzar, se ha propuesto el sistema compuesto de laminados de fibra de carbono adheridos externamente en la cara traccionada de la viga de hormigón, de forma que no se reduzca la altura libre de planta.

7.1.1 - Situación inicial

En primer lugar, vamos a calcular el armado de la viga para soportar las cargas iniciales que actúan sobre ella. Este procedimiento lo realizaremos en base a la EHE-08.



Datos:

Hormigón, $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$

$G = 20 \text{ KN/m}$

Acero, $f_{yk} = 400 \text{ MPa}$

$Q = 15 \text{ KN/m}$

Cálculo del momento de sollicitación

Según la EHE-08, aplicamos los coeficientes correspondientes de mayoración de cargas:

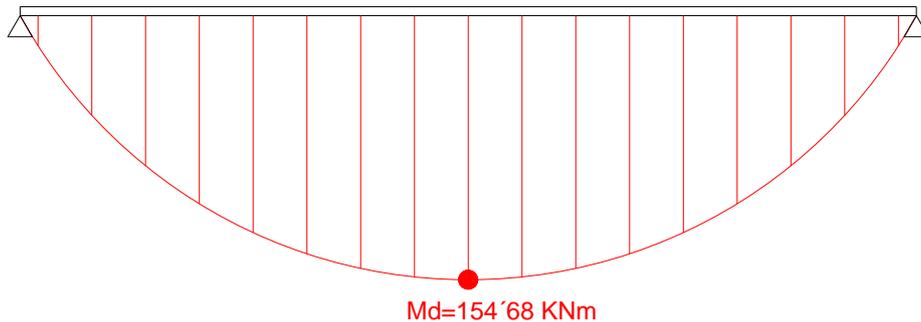
$$G = 20 \text{ KN/m} \cdot 1'35 \text{ (coef. Permanentes)} = 27 \text{ KN/m}$$

$$Q = 15 \text{ KN/m} \cdot 1'50 \text{ (coef. Variables)} = 22'50 \text{ KN/m}$$

$$\text{TOTAL} = 49'50 \text{ KN/m}$$

Procedemos ahora al cálculo del momento resistente de diseño, M_d :

$$M_d = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{49'50 \cdot 5^2}{8} = 154'68 \text{ KNm}$$



Una vez hallado el momento que debe resistir la viga, dimensionamos su armadura longitudinal, inferior A_{s1} y superior A_{s2} , para esta sollicitación.

Cálculo del momento resistente

Aplicamos los coeficientes reductores sobre los materiales, según EHE-08:

$$\text{HA} - 25, f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1'50} = 16'67 \text{ MPa}$$

$$\text{Acero B400S}, f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{400}{1'15} = 347'83 \text{ MPa}$$

Dimensionamos el armado de la viga, para ello será necesario definir el momento máximo que puede soportar la viga y realizar las comprobaciones necesarias:

$$U_c = f_{cd} \cdot b \cdot d = 16'67 \cdot 300 \cdot 450 = 2.250'45 \text{ KN}$$

$$M_{max} = 0'295 \cdot U_c \cdot d = 0'295 \cdot 2'25 \cdot 10^3 \cdot 0'45 = \mathbf{298'68 \text{ KNm}}$$

De modo que:

$$M_{max} = \mathbf{298'68 \text{ KNm}} > M_d = \mathbf{154'68 \text{ KNm}}$$

Dado que el momento máximo es mayor que el momento solicitante, **no es necesaria armadura a compresión** puesto que la resistencia del hormigón es suficiente para soportar las compresiones. Partiremos de $A_{s2} = 0$ y calcularemos la armadura de tracción necesaria, mediante la expresión:

$$A_{s1} = \frac{U_{s1}}{f_{yd}} = \frac{U_{cr} \cdot r}{f_{yd}}$$

donde:

$$r \text{ se obtiene de: } M_d = U_c \cdot d \cdot r^2 \quad \rightarrow \quad r = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_d}{U_c \cdot d}}$$

$$r = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 154'68 \text{ KNm}}{2.250'45 \text{ KN} \cdot 0'45 \text{ m}}} = \mathbf{0'1666}$$

Sustituyendo el valor de r en la fórmula del armado, obtenemos la sección del armado a tracción (despreciando la de compresión):

$$A_{s1} = \frac{U_{cr} \cdot r}{f_{yd}} = \frac{2.250'45 \text{ KN} \cdot 0'1666}{347'83 \cdot 10^{-3} \text{ KN/mm}^2} = \mathbf{1.077'89 \text{ mm}^2}$$

Consultando la tabla de secciones de las armaduras (cm^2) y masas (Kg/m), obtenemos el diámetro y número de barras del armado necesario. En este caso, para la sección calculada $A_{s1} = 1.077'89 \text{ mm}^2$, le corresponde una armadura formada por **4Ø20mm** con una sección total de **$A_{s1} = 1.257 \text{ mm}^2$** .

Para comprobar la validez de nuestra sección de armado, en el artículo 42.3.5 de la EHE-08 encontramos las cuantías geométricas mínimas ($\%$) referidas a la sección total de hormigón, en función del tipo de elemento estructural y del tipo de acero.

Para nuestra viga con acero $f_{yk}=400 \text{ N/mm}^2$, obtenemos que las armaduras longitudinales inferiores A_{s1} :

$$A_{s1} \geq A_{s1min} = 3'3 \text{ ‰} \cdot A_c = \frac{3'3}{1000} \cdot 500 \cdot 300 = \mathbf{495 \text{ mm}^2}$$

$$A_{s1} = \mathbf{1.257 \text{ mm}^2} > A_{s1min} = \mathbf{495 \text{ mm}^2} \quad \rightarrow \quad \mathbf{CUMPLE}$$

La cuantía mínima de la armadura superior deberá cumplir que su sección sea el 30% del armado mínimo inferior. En nuestro caso la hemos tomado =0, por lo que cumpliendo la EHE-08 vamos a calcular el armado mínimo superior:

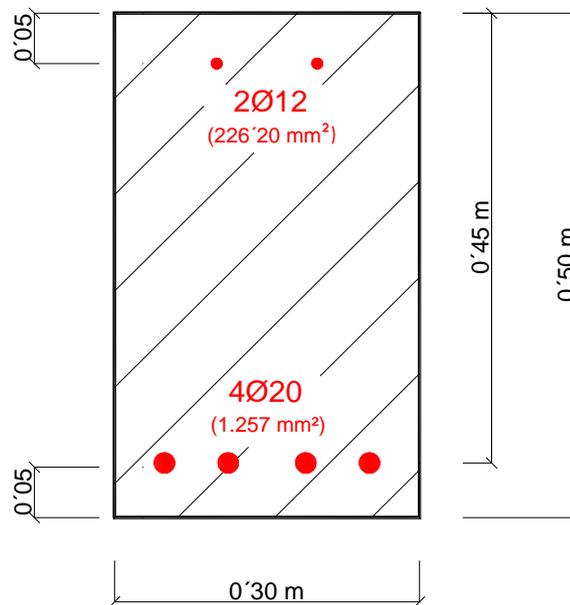
$$A_{s2} \geq 30\% A_{s1min} = \frac{30}{100} \cdot 495 = 148'50 \text{ mm}^2$$

$$A_{s2min} \geq 148'50 \text{ mm}^2$$

Consultando la tabla de armados, colocaremos **2Ø12** con una sección total **A_{s2}= 226'20 mm²**:

$$A_{s2} = 226'20 \text{ mm}^2 > A_{s2min} = 148'50 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{CUMPLE}$$

La sección de la viga corresponde a la figura:



7.1.2 - Comprobación de la necesidad de refuerzo

Debido al cambio de uso del edificio, las cargas variables aplicadas sobre la viga se incrementan en un 50% ($Q' = Q \cdot 1'50$). Procedemos a continuación al cálculo de las nuevas acciones mayoradas aplicadas sobre la viga:

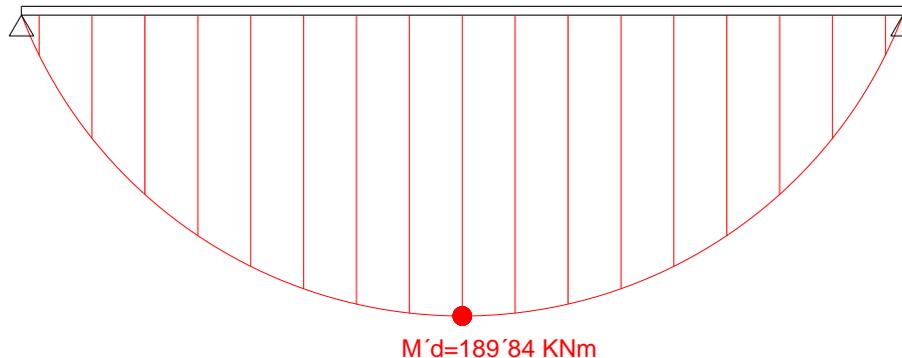
$$G = 20 \text{ KN/m} \cdot 1'35 \text{ (coef. Permanentes)} = 27 \text{ KN/m}$$

$$Q' = 15 \text{ KN/m} \cdot 1'50 = 22'50 \text{ KN/m} \rightarrow 22'50 \cdot 1'50 \text{ (coef. Variables)} = 33'75 \text{ KN/m}$$

$$\text{TOTAL} = 60'75 \text{ KN/m}$$

Halladas las nuevas acciones sobre la viga biapoyada, procedemos ahora al cálculo del nuevo momento de diseño debido al cambio de uso, M'_d :

$$M'_d = \frac{q' \cdot L^2}{8} = \frac{60'75 \cdot 5^2}{8} = \mathbf{189'84 \text{ KNm}}$$



Una vez calculado el momento resistente de diseño relacionado con el cambio de uso, vamos a comprobar si el armado de la viga es suficiente para soportar la nueva sollicitación o si por el contrario es necesario reforzar. Para ello procederemos a calcular el momento último de la sección, M_u , de forma que:

si $M_u < M'_d$, es necesario reforzar la viga.

Calculamos el momento último, despreciando el armado a compresión por lo poco que contribuye:

$$M_u = U_{s1} \cdot d \cdot [1 - 0'5 \cdot (U_{s1}/U_c)]$$

donde:

$$U_{s1} = A_{s1} \cdot f_{yd} = 1.257 \text{ mm}^2 \cdot 347'83 \text{ N/mm}^2 = 437.222'31 \text{ N}$$

$$U_c = 16'67 \text{ N/mm}^2 \cdot 300 \text{ mm} \cdot 450 \text{ mm} = 2.250.450 \text{ N}$$

$$d = 450 \text{ mm}$$

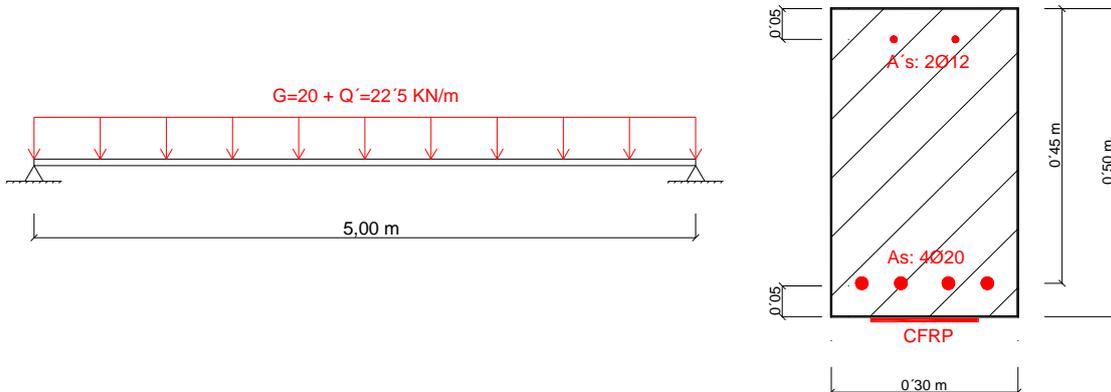
$$M_u = 437'22 \text{ KN} \cdot 450 \text{ mm} \cdot [1 - 0'5 \cdot (437'22 \text{ KN}/2.250'45 \text{ KN})]$$

$$M_u = 177.636'69 \text{ KNmm} = \mathbf{177'63 \text{ KNm}}$$

se cumple que $M'_d = 189'84 \text{ KNm} > M_u = 177'63 \text{ KNm}$, es necesario reforzar.

La sección de la viga no soporta el nuevo momento de sollicitación ya que el momento último es menor que el momento que debe resistir como resultado de aplicar la sobrecarga. Se tiene que reforzar la sección y se opta por la aplicación del refuerzo mediante laminados de fibra de carbono (CFRP) aplicados sobre la cara inferior de la viga. En primer lugar, calcularemos el refuerzo siguiendo la guía de diseño ACI 440.

7.2 - DISEÑO DE REFUERZO A FLEXIÓN MEDIANTE ACI 440



Datos:

$$l = 5'00 \text{ m (luz)}$$

$$f'_c = 25 \text{ N/mm}^2$$

$$w = 30 \text{ cm (ancho de viga)}$$

$$f'_y = 400 \text{ N/mm}^2$$

$$d = 45 \text{ cm}$$

$$\phi M_n (\text{sin refuerzo}) = 186'32 \text{ KNm}$$

$$h = 50 \text{ cm}$$

$$\text{Barras} = 4\text{Ø}20$$

Se muestran en tabla 7.1 las cargas nuevas y existentes y los momentos asociados:

Cargas / Momentos	Cargas existentes	Cargas previstas
Cargas Permanentes (W_{DL})	20 KN/m	20 KN/m
Cargas Variables (W_{LL})	15 KN/m	22'50 KN/m
Cargas sin Mayorar ($W_{DL}+W_{LL}$)	35 KN/m	20 KN/m
Límite de Carga sin Reforzar ($1'2 \cdot W_{DL} + 0'85 \cdot W_{LL}$)		43'13 KN/m
Cargas Mayoradas ($1'4 \cdot W_{DL} + 1'7 \cdot W_{LL}$)	53'50 KN/m	66'25 KN/m
Mto de Cargas Permanentes ($M_{DL} = W_{DL} \cdot L^2 / 8$)	62'50 KNm	62'50 KNm
Momento de Cargas Variables ($M_{LL} = W_{LL} \cdot L^2 / 8$)	46'87 KNm	70'31 KNm
Momento de Servicio ($M_S = M_{DL} + M_{LL}$)	109'37 KNm	132'81 KNm
Mto Límite sin Reforzar ($1'2 \cdot M_{DL} + 0'85 \cdot M_{LL}$)		134'76 KNm
Momento Mayorado ($M_u = 1'4 \cdot M_{DL} + 1'7 \cdot M_{LL}$)	167'18 KNm	207'03 KNm

Tabla 7.1 Cargas y sus correspondientes momentos

Se propone reforzar la viga existente de hormigón armado mediante laminado de fibra de carbono (CFRP) adherido en la cara traccionada. En concreto, mediante un laminado de 50 mm. de ancho cuyas propiedades son las indicadas por el fabricante:

- *Espesor (t_f): 1'20 mm; ancho (w): 50'00 mm; sección (A_f): 60'00 mm²*
- *Resistencia Última a Tracción (f_{fu}^*): 3'10 KN/mm²*
- *Deformación de Rotura (ϵ_{fu}^*): 0'017*
- *Módulo de Elasticidad (E_f): 165 KN/mm²*

La guía ACI 440 exige las comprobaciones iniciales de resistencia y resistencia al fuego del elemento estructural que va a ser reforzado y que debe satisfacer antes de la aplicación del refuerzo. Corresponden a:

Resistencia:

$$\phi M_n(\text{sin refuerzo}) \geq (1'2 \cdot M_{DL} + 0'85 \cdot M_{LL})_{Nuevas}$$

El segundo término ya lo hemos calculado en la tabla 7.1. Observe que se toman los valores de las cargas con el incremento posterior al cambio de uso:

$$(1'2 \cdot M_{DL} + 0'85 \cdot M_{LL})_{Nuevas} = 134'76 \text{ KNm}$$

De la guía ACI 318 obtenemos el momento resistente nominal:

$$\phi M_n(\text{sin refuerzo}) = \phi \cdot A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$$

donde:

ϕ : 0'90 (coef. Flexión, ACI 318)

β_1 : 0'85 (HA-25, ACI 318)

c : 0'20· d : 0'20·450 : 90 mm. (estimación ACI 440)

A_s : 1.257 mm²

f_y : 400 MPa

$$\phi M_n(\text{sin refuerzo}) = 0'90 \cdot 1.257 \cdot 400 \cdot \left(450 - \frac{0'85 \cdot 90}{2} \right)$$

$$\phi M_n(\text{sin refuerzo}) = 186'32 \text{ KNm (incluido en datos)}$$

De modo que:

$$186'32 \text{ KNm} > 134'76 \text{ KNm} \rightarrow \text{CUMPLE}$$

Resistencia al Fuego:

$$(M_{n\theta})_{Existente} \geq M_{DL} + M_{LL}$$

Los valores del segundo término los tenemos en la tabla 7.1. En este caso, también debe cumplir el valor de las cargas posteriores al cambio de uso:

$$(M_{DL} = 62'50 \text{ KNm}) + (M_{LL} = 70'31 \text{ KNm}) = 132'81 \text{ KNm}$$

De la guía ACI 216R y los siguientes datos:

Viga simplemente apoyada (1 vano)

Hormigón HA-25 de árido silíceo

Fuego en la cara inferior

Tiempo del incendio (estimación): 180 min.

Obtenemos la fórmula del momento nominal limitado por el fuego:

$$M_{n\theta} = A_s \cdot f_{y\theta} \cdot \left(d - \frac{a_\theta}{2} \right)$$

donde:

θ : *Coefficiente del fuego (efecto de elevadas T^{as})*

A_s : *1.257 mm²*

d : *450 mm*

$f_{y\theta}$: *Límite elástico del acero a T^{as} elevadas*

a_θ : *Profundidad del diagrama de tensiones equivalentes*

Para hallar el valor de θ necesitamos conocer los valores de n y t , e introducirlos en la Fig 7.1.1.b (ACI 216R):

$$\left. \begin{array}{l} n: \text{Recubrimiento efectivo promedio } n = \text{recubrimiento} + 1/2 \cdot \phi \\ n = 40 \text{ mm} + 1/2 \cdot 20 = 50 \text{ mm} \\ t: \text{tiempo, } 180 \text{ min.} \end{array} \right\} \theta: 500^\circ\text{C}$$

A continuación, calculamos el límite elástico del acero $f_{y\theta}$, introduciendo el valor de $\theta: 500^\circ\text{C}$ en la Fig 5.1 (ACI 216R):

$$\frac{f_{y\theta}}{f_y} = 0'80 \rightarrow f_{y\theta} = 320 \text{ MPa}$$

Por último, introducimos los datos para hallar el valor de a_θ (el valor $f'_c = f'_{c\theta}$ dado que no se reduce significativamente en la capa de compresión):

$$a_\theta = \frac{A_s \cdot f_{y\theta}}{0'85 \cdot f'_{c\theta} \cdot b} = \frac{1.257 \text{ mm}^2 \cdot 320 \text{ N/mm}^2}{0'85 \cdot 25 \text{ N/mm}^2 \cdot 300 \text{ mm}} = 63'09 \text{ mm}$$

Calculamos el momento limitado por el fuego:

$$M_{n\theta} = 1.257 \cdot 320 \cdot \left(450 - \frac{63'09}{2}\right)$$

$$\mathbf{M_{n\theta} = 168'32 \text{ KNm}}$$

De modo que:

$$\mathbf{168'32 \text{ KNm} > 132'81 \text{ KNm} \rightarrow \text{CUMPLE}}$$

La viga cumple satisfactoriamente con las comprobaciones iniciales previas al refuerzo que exige ACI 440, de modo que satisface las condiciones de seguridad para situaciones accidentales y puede ser reforzada mediante FRP. Comenzamos ahora con el procedimiento de diseño del refuerzo que verifique la validez de nuestro sistema propuesto en primer lugar:

·Paso 1: Calcular las propiedades del sistema de refuerzo FRP de diseño; en nuestro caso la viga está ubicada en un espacio interior y se empleará un refuerzo con fibra de carbono CFRP. Por lo tanto, insertados nuestro datos en la tabla 8.1 de ACI 440, obtenemos un coeficiente reductor de ambiente = 0'95.

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* = 0'95 \cdot 3.100 \text{ N/mm}^2 = 2.945 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* = 0'95 \cdot 0'017 = 0'01615$$

·Paso 2: Cálculos preliminares.

Propiedades del hormigón:

$$\beta_1 = 0'85 \text{ (ACI - 318 para hormigón HA - 25 MPa = 3.625 psi)}$$

$$E_c = 57.000 \sqrt{f'_c} \text{ (en psi)} = 57.000 \sqrt{3625 \text{ psi}} = 3.431.854'45 \text{ psi} = 23.667'96 \text{ MPa}$$

Propiedades del acero:

$$\rho_s = \frac{A_s}{b \cdot d}$$

$$A_s = 4\phi 20 = 1.257 \text{ mm}^2$$

$$\rho_s = \frac{1.257 \text{ mm}^2}{300 \text{ mm} \cdot 450 \text{ mm}} = 0'009311$$

Propiedades del refuerzo CFRP:

$$\rho_s = \frac{A_f}{b \cdot d}$$

$$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f = 1 \cdot 1'20 \text{ mm} \cdot 50'00 \text{ mm} = 60'00 \text{ mm}^2$$

$$\rho_s = \frac{60 \text{ mm}^2}{300 \text{ mm} \cdot 450 \text{ mm}} = 0'000444$$

-Paso 3: Determinar el estado de deformación existente en la cara traccionada de la viga. La deformación existente se calcula asumiendo que la cara traccionada está fisurada y que las únicas cargas que actúan en el momento de la instalación del refuerzo son las permanentes.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - k \cdot d)}{I_{cr} \cdot E_c}$$

Un análisis de la sección fisurada de la viga existente nos da los valores de k e I_{cr} . Calculamos su valor mediante consulta de la guía ACI 318, (Fig.7.2):

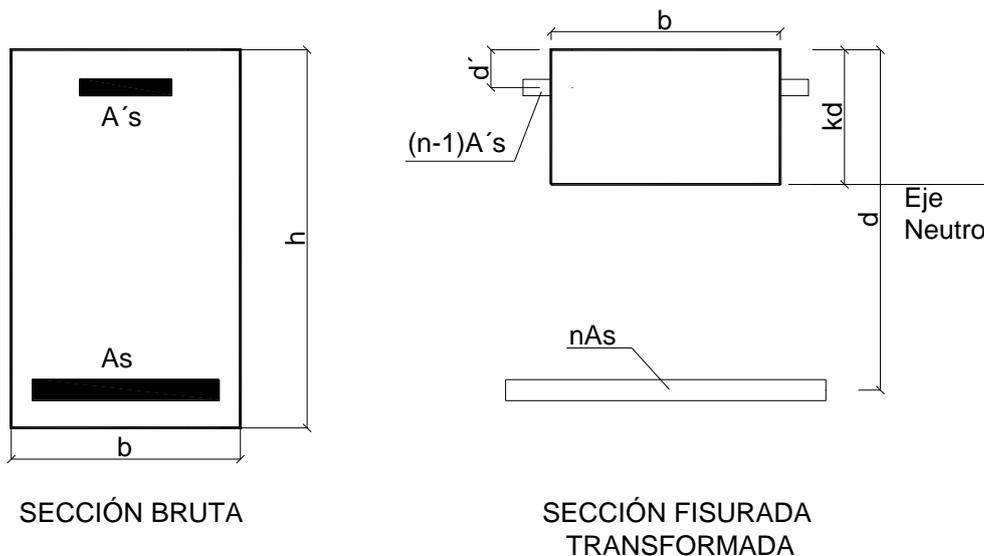


Figura 7.2 Análisis de la sección fisurada

Se plantean los datos:

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200.000 \text{ N/mm}^2}{23.667'96 \text{ N/mm}^2} = 8'45$$

$$B = \frac{b}{n \cdot A_{s1}} = \frac{300 \text{ mm}}{8'45 \cdot 1.257 \text{ mm}^2} = 0'0282442$$

$$r = (n - 1) \cdot A_{s2} / n \cdot A_{s1} = (8'45 - 1) \cdot 226'20 \text{ mm} / 8'45 \cdot 1.257 \text{ mm}^2 = 0'158656$$

$$kd = \left[\sqrt{2 \cdot b \cdot B \cdot (1 + r \cdot d'/d) + (1 + r)^2} - (1 + r) \right] / B =$$

$$= \frac{\left[\sqrt{2 \cdot 450 \cdot 0'0282442 \cdot (1 + 0'158656 \cdot 50 / 450) + (1 + 0'158656)^2} - (1 + 0'158656) \right]}{0'282442}$$

$$kd = 143'66 \text{ mm} \longrightarrow k = 143'66 \text{ mm} / 450 \text{ mm} = 0'31925$$

$$I_{cr} = b \cdot (k \cdot d)^3 / 3 + n \cdot A_{s1} \cdot (d - k \cdot d)^2 + (n - 1) \cdot A_{s2} \cdot (k \cdot d - d')^2 =$$

$$= 300 \cdot (143'66)^3 / 3 + 8'45 \cdot 1.257 \cdot (450 - 143'66)^2 + (8'45 - 1) \cdot 226'20 \cdot (143'66 - 50)^2 =$$

$$I_{cr} = 1.308.051.333 \text{ mm}^4$$

Y calculamos finalmente el valor de la deformación existente ϵ_{bi} :

$$\epsilon_{bi} = \frac{62.500 \text{ KNmm} \cdot (500 \text{ mm} - 143'66 \text{ mm})}{1.308.051.333 \text{ mm}^4 \cdot 23'67 \text{ KN/mm}} = 0'00071931$$

.Paso 4: Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema CFRP. El coeficiente de dependencia del adhesivo para flexión κ_m se calcula en función del valor resultante de comparar:

$$n \cdot E_f \cdot t_f \text{ con } 180.000 \longrightarrow 1 \cdot 165.000 \cdot 1'20 = 198.000 > 180.000 \text{ N/mm}$$

De forma que aplicamos la siguiente expresión para hallar κ_m :

$$\kappa_m = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{fu}} \cdot \left(\frac{90.000}{n \cdot E_f \cdot t_f} \right) \leq 0'90$$

$$\kappa_m = \frac{1}{60 \cdot 0'01615} \cdot \left(\frac{90.000 \text{ N/mm}}{198.000 \text{ N/mm}} \right) = 0'46908 < 0'90$$

.Paso 5: Estimar c , la profundidad del eje neutro. Un valor razonable de c es $0'20 \cdot d$. El valor final se ajusta después de comprobar el equilibrio.

$$c = 0'20 \cdot d = 0'20 \cdot 450 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$$

.Paso 6: Determinar el nivel eficaz de deformación en el refuerzo. Lo tenemos en la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{fe} = 0'003 \cdot \left(\frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \cdot \varepsilon_{fu}$$

Destacar que para la profundidad del eje neutro seleccionada, el aplastamiento del hormigón sería el modo de fallo porque la primera ecuación controla. Si la segunda (límite) expresión gobierna, entonces el fallo del FRP sería el modo de fallo.

$$\varepsilon_{fe} = 0'003 \cdot \left(\frac{500 \text{ mm} - 90 \text{ mm}}{90 \text{ mm}} \right) - 0'00071931 \leq 0'46908 \cdot 0'01615$$

$$0'012947 \leq 0'0075756 \longrightarrow \text{No es correcto}$$

El resultado de la primera ecuación es mayor que la límite. En este caso, el modo de fallo es el fallo del FRP y el resultado final, el valor límite de deformación:

$$\varepsilon_{fe} = 0'0075756$$

.Paso 7: Calcular la deformación en el armado existente. Puede calcularse utilizando la semejanza de triángulos:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{h - c} \right)$$

$$\varepsilon_s = (0'0075756 + 0'00071931) \cdot \left(\frac{450 \text{ mm} - 90 \text{ mm}}{500 \text{ mm} - 90 \text{ mm}} \right) = 0'0072833$$

·Paso 8: Calcular el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo CFRP. Para ello aplicamos las siguientes ecuaciones, en primer lugar del acero:

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y$$

$$f_s = 200 \text{ KN/mm}^2 \cdot 0'0072833 = 1'4566 < 0'40 \text{ KN/mm}^2 \longrightarrow \text{No es correcto}$$

El valor de la tensión en el acero es superior a su límite elástico, por lo que su tensión máxima será limitada a éste límite elástico:

$$f_s = 0'40 \text{ KN/mm}^2$$

En el caso del refuerzo, dado que hemos calculado el valor de su deformación eficaz para nuestro caso concreto, inferior a la deformación última, no existe limitación en la tensión porque en ningún caso alcanzaremos la máxima posible.

$$f_{fe} = f_{fe} \cdot \varepsilon_{fe}$$

$$f_{fe} = 165 \text{ KN/mm}^2 \cdot 0'0075756 = 1'24997 \text{ KN/mm}^2$$

·Paso 9: Calcular las fuerzas internas resultantes y comprobar el equilibrio. El equilibrio de fuerzas se verifica comprobando la estimación inicial de c con la siguiente expresión:

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\gamma \cdot f_c \cdot \beta_1 \cdot b}$$

donde, según ACI 318:

β_1 y γ : 0'85, para HA-25

$$c = \frac{1.257 \text{ mm}^2 \cdot 400 \text{ N/mm}^2 + 60 \text{ mm}^2 \cdot 1.249'97 \text{ N/mm}^2}{0'85 \cdot 25 \text{ N/mm}^2 \cdot 0'85 \cdot 300 \text{ mm}} = 106'63 \text{ mm}$$

$$c = 106'63 \text{ mm} \neq 90 \text{ mm (estimado)}$$

·Paso 10: Ajustar el valor de c para cumplir el equilibrio de fuerzas. Debemos repetir los pasos desde el 6 hasta el 9 varias veces con diferentes valores de c hasta alcanzar el equilibrio.

Paso 6: En este caso, vamos a estimar la profundidad del eje neutro $c=106$ mm. Calculamos el nivel de deformación eficaz del refuerzo:

$$\varepsilon_{fe} = 0'003 \cdot \left(\frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \cdot \varepsilon_{fu}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0'003 \cdot \left(\frac{500 \text{ mm} - 106 \text{ mm}}{106 \text{ mm}} \right) - 0'00071931 \leq 0'46908 \cdot 0'01615$$

$$0'010431 \leq 0'0075756 \longrightarrow \text{No es correcto}$$

De nuevo, el modo de fallo es el fallo del FRP y el resultado final, el valor límite de deformación:

$$\varepsilon_{fe} = 0'0075756$$

Paso 7: Calculamos la deformación del acero:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{h - c} \right)$$

$$\varepsilon_s = (0'0075756 + 0'00071931) \cdot \left(\frac{450 \text{ mm} - 106 \text{ mm}}{500 \text{ mm} - 106 \text{ mm}} \right) = 0'0072422$$

Paso 8: Calculamos el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo:

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y$$

$$f_s = 200 \text{ KN/mm}^2 \cdot 0'0072422 = 1'4484 < 0'40 \text{ KN/mm}^2 \longrightarrow \text{No es correcto}$$

Como en el primer caso, la tensión en el acero está limitada a su límite elástico:

$$f_s = 0'40 \text{ KN/mm}^2$$

$$f_{fe} = f_{fe} \cdot \varepsilon_{fe}$$

No existe variación en la deformación eficaz del refuerzo, con lo que el valor de la tensión en él es igual que en el caso anterior:

$$f_{fe} = 165 \text{ KN/mm}^2 \cdot 0'0075756 = 1'24997 \text{ KN/mm}^2$$

Paso 9: Comprobamos el equilibrio:

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\gamma \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b}$$

$$c = \frac{1.257 \text{ mm}^2 \cdot 400 \text{ N/mm}^2 + 60 \text{ mm}^2 \cdot 1.249'97 \text{ N/mm}^2}{0'85 \cdot 25 \text{ N/mm}^2 \cdot 0'85 \cdot 300 \text{ mm}} = 106'63 \text{ mm}$$

$$c = 106'63 \text{ mm} = 106 \text{ mm (estimado)}$$

En la iteración con $c=106 \text{ mm}$ hemos hallado el equilibrio de fuerzas. Obsérvese que los valores del paso 9, a pesar de darle mayor profundidad al eje neutro, no han variado de la primera estimación de c debido a las limitaciones en la deformación eficaz del refuerzo y tensión en acero. **Hemos completado el paso 10.**

-Paso 11: Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección. En este caso, hay que aplicar un coeficiente reductor adicional $\psi_f = 0'85$ a la contribución del CFRP. Por otro lado, en lo relativo a la ductilidad y debido a que $\varepsilon_s = 0'0072422 > 0'005$, el factor reductor de resistencia $\phi = 0'90$ es el correcto.

$$\phi M_n = \phi \left[A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \right]$$

$$\phi M_n = 0'90 \left[1.257 \cdot 400 \cdot \left(450 - \frac{0'85 \cdot 106}{2} \right) + 0'85 \cdot 60 \cdot 1.249'97 \cdot \left(500 - \frac{0'85 \cdot 106}{2} \right) \right]$$

$$\phi M_n = 209.350.103'80 \text{ Nmm} = 209'03 \text{ KNm}$$

En este punto hemos hallado el momento resistente de la sección de hormigón armado reforzada con un laminado de 50 mm de ancho de fibra de carbono. Para verificar la validez del refuerzo, comparamos con el momento solicitante mayorado.

Si $\phi M_n > M_u$ el refuerzo cumple con el esfuerzo solicitado:

$$\phi M_n = 209'35 \text{ KNm} > M_u = 207'03 \text{ KNm} \rightarrow \text{CUMPLE}$$

La sección reforzada es capaz de soportar el nuevo momento requerido.

-Paso 12: Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica:

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{h}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)$$

$$\sqrt{\left(0'009311 \cdot \frac{200}{23'67} + 0'000444 \cdot \frac{165}{23'67}\right)^2 + 2 \left(0'009311 \cdot \frac{200}{23'67} + 0'000444 \cdot \frac{165}{23'67} \left(\frac{500}{450}\right)\right)} - \left(0'009311 \cdot \frac{200}{23'67} + 0'000444 \cdot \frac{165}{23'67}\right) =$$

$$k = 0'33165$$

$$kd = 0'33165 \cdot 450 \text{ mm} = 149'24 \text{ mm}$$

Ya tenemos la profundidad del eje neutro en estado elástico. Ahora calculamos el nivel de tensión del armado mediante la ecuación planteada y verificaremos que es inferior al límite recomendado.

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot \left(h - \frac{k \cdot d}{3}\right)\right] \cdot (d - k \cdot d) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot \left(d - \frac{k \cdot d}{3}\right) \cdot (d - k \cdot d) + A_f \cdot E_f \cdot \left(h - \frac{k \cdot d}{3}\right) \cdot (h - k \cdot d)}$$

$$\frac{\left[132.810 + 0'00071931 \cdot 60 \cdot 165 \left(500 - \frac{149'24}{3}\right)\right] (450 - 149'24) 200}{1.257 \cdot 200 \left(450 - \frac{149'24}{3}\right) (450 - 149'24) + 60 \cdot 165 \left(500 - \frac{149'24}{3}\right) (500 - 149'24)} =$$

$$f_{s,s} = 0'256 \text{ KN/mm}^2 = 256'74 \text{ N/mm}^2$$

Limitación en estado de servicio: $f_{s,s} \leq 0'80 f_y$

$$256'74 \leq 0'80 \cdot 400 \text{ N/mm}^2$$

$$256'74 \text{ N/mm}^2 < 320 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{CUMPLE}$$

El nivel de tensión en el armado está dentro del límite recomendado.

El nivel de tensiones en el refuerzo CFRP es estado de servicio no se ha verificado dado que su cálculo y limitaciones se realizan en base a elementos sometidos a cargas cíclicas. No es nuestro caso puesto que las cargas son de tipo monótonas, como corresponde al uso de edificación.

-Solape del refuerzo:

Como detalle del refuerzo mediante sistema CFRP, cabe destacar que el laminado debe terminar a una distancia de solape igual a d , como mínimo, desde el punto donde se produce el momento de fisuración.

$$d = 450 \text{ mm (canto útil)}$$

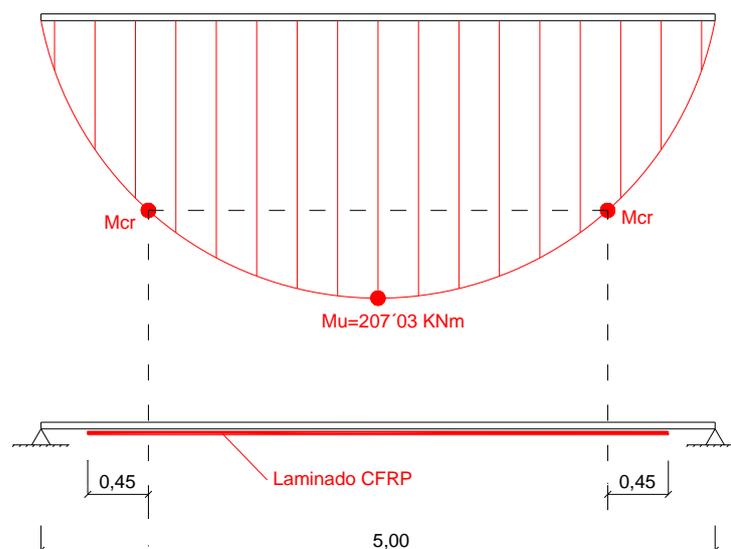


Figura 7.3 Longitud de solape del refuerzo en función del valor del momento de fisuración

Calculamos el momento de fisuración M_{cr} consultando la guía ACI 318:

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} \quad \text{para hormigones con áridos de peso normal (no ligero)}$$

donde:

f_r : Módulo de rotura del hormigón

$$f_r = 0.62 \sqrt{f_c} = 0.62 \sqrt{25} = 3.11 \text{ N/mm}^2$$

I_g : Momento de inercia de la sección bruta de hormigón alrededor del eje centroidal, sin incluir el armado

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{300 \cdot 500^3}{12} = 3.125.000.000 \text{ mm}^4$$

y_t : Distancia del eje centroidal de la sección bruta hasta la fibra extrema a tracción, sin incluir el armado

$$y_t = \frac{h}{2} = \frac{500}{2} = 250 \text{ mm}$$

El momento de fisuración resulta:

$$M_{cr} = \frac{3.11 \text{ N/mm}^2 \cdot 3.125.000.000 \text{ mm}^4}{250 \text{ mm}} = 38.875.000 \text{ Nmm}$$

$$M_{cr} = 38.87 \text{ KNm}$$

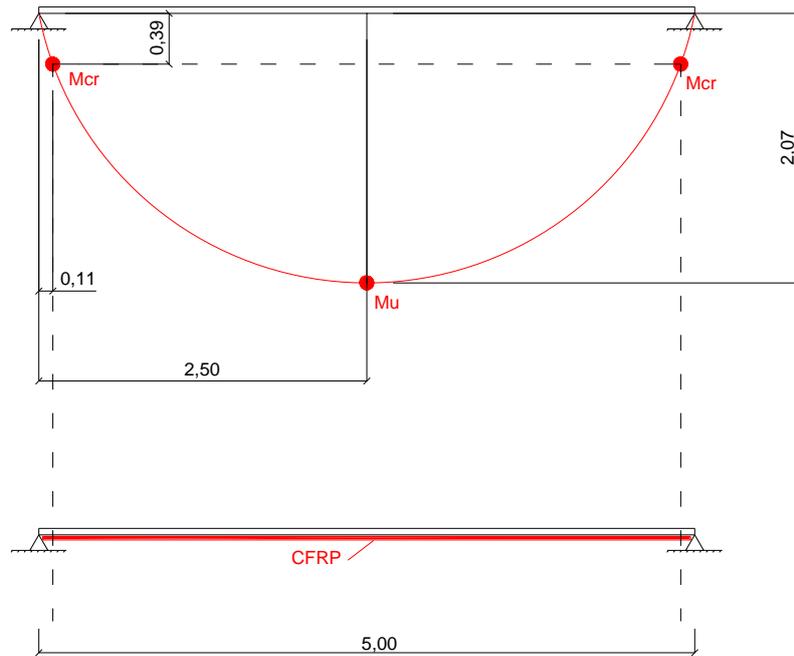


Figura 7.4 Longitud final del refuerzo

La situación del momento fisurado en el diagrama, a tan sólo 11 cm del apoyo de la viga, conduce a la colocación del refuerzo en toda la longitud de la viga hasta los dos apoyos. El laminado de refuerzo de 50 mm. se colocará en el eje de la cara inferior de la viga.

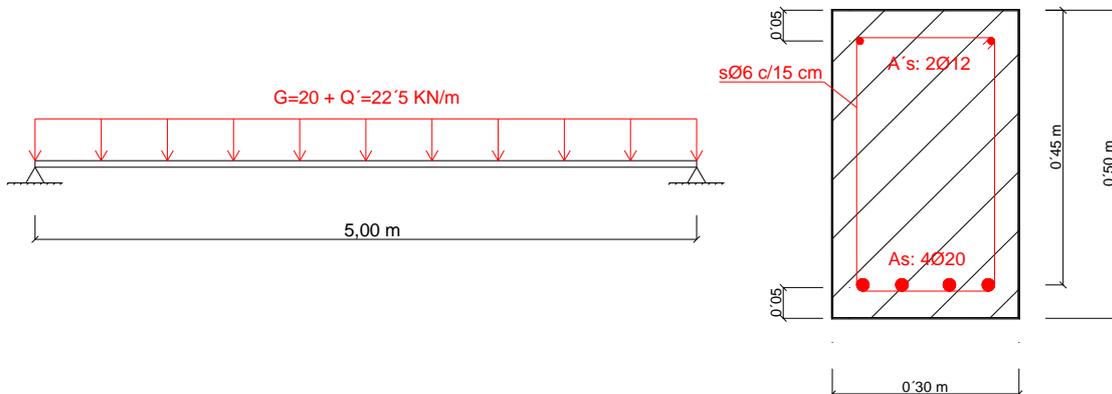
7.3 - COMPROBACIÓN A ESFUERZO CORTANTE SEGÚN GUÍA ACI 440

Una vez diseñado el refuerzo a flexión de la viga mediante laminado de fibra de carbono, vamos a comprobar que la viga es capaz de soportar los nuevos esfuerzos cortantes debido al cambio de uso. Dado que nuestro refuerzo CFRP está calculado para trabajar conjuntamente con la viga a esfuerzos de flexión, no se incluye en el cálculo para comprobar la resistencia a cortante.

En caso de no soportar el cortante, ya hemos estudiado las variantes de refuerzo mediante sistema de materiales compuestos de forma que analizaremos y aplicaremos el que mejor se adapte, en caso de ser necesario.

El diseño del refuerzo a cortante mediante CFRP lo hemos estudiado según las indicaciones que aparecen en la guía ACI 440, donde los cálculos están referenciados a la guía ACI 318. De este modo, el cálculo realizado para la comprobación a cortante de la viga se ha basado en la guía ACI 318. En caso de ser necesario refuerzo, aplicaremos el procedimiento de trabajo de ACI 440 para su diseño. Destacar que para el planteamiento del caso, se ha optado por trabajar con las mismas unidades de ACI 318, que corresponden al sistema anglosajón, y así vienen expresadas las formulaciones para el cálculo en la guía. Posteriormente se realiza la conversión al sistema internacional.

7.3.1 - Planteamiento del problema



Datos:

Hormigón, $f_{ck}=25 \text{ MPa}$ (3.625 psi)

$G=20 \cdot 1'35=27 \text{ KN/m}$

Acero, $f_{yk}=400 \text{ MPa}$ (58.000 psi)

$Q=22'5 \cdot 1'50=33'75 \text{ KN/m}$

$w_u=60'75 \text{ KN/m}$ (4'16 kips/ft)

7.3.2 - Cálculo de la resistencia a cortante

Para la conformidad de la resistencia de la viga a esfuerzo cortante se debe cumplir que:

$$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s \geq V_u$$

donde:

ϕ : 0'75 (coef. Cortante, ACI 318)

V_c : Resistencia a cortante del hormigón

V_n : Resistencia nominal a cortante

V_s : Resistencia a cortante del acero

V_u : Fuerza cortante mayorada

-Paso 1: Cálculo de la fuerza cortante mayorada. Es importante destacar que la fuerza cortante de cálculo, ACI-318 la toma a una distancia d (canto útil) desde el apoyo, siendo este valor el que se mantiene hasta el mismo. Así lo indica en el apartado 11.1.3.1, donde justifica que las cargas actuantes en el espacio entre el apoyo y d se transmiten hasta el apoyo por compresión en el alma de la viga.

$$V_u = w_u \cdot L/2$$

$$V_u = 60'75 \text{ KN/m} \cdot 5 \text{ m}/2 = \mathbf{151'88 \text{ KN (34'14 Kips)}, en el apoyo}$$

A una distancia d desde el apoyo, resulta:

$$V_u = (w_u \cdot L/2) - w_u \cdot d$$

$$V_u = (60'75 \cdot 5 / 2) - 60'75 \cdot 0'45 = \mathbf{124'53 \text{ KN (28'00 Kips)}, en distancia = d}$$

Como hemos comentado, éste valor de cortante último es el que aplicaremos en el cálculo para la comprobación de resistencia (Fig.7.5):

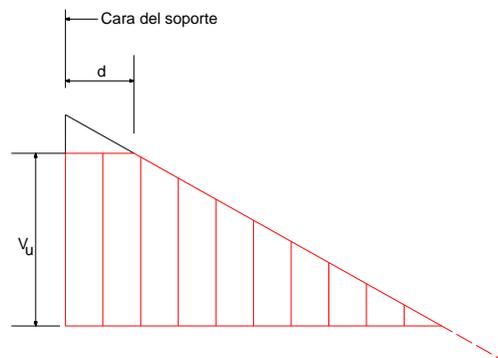


Figura 7.5 Valores de cálculo para cortante

·Paso 2: Determinar la resistencia a corte del hormigón (en sistema anglosajón).

$$V_c = \phi \cdot 2 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$$

$$V_c = 0.75 \cdot 2 \cdot \sqrt{3.625 \text{ psi}} \cdot 11.81 \text{ in} \cdot 17.71 \text{ in} / 1000 = \mathbf{18.89 \text{ Kips (84.02 KN)}}$$

·Paso 3: Determinar la resistencia del acero a cortante. La armadura está compuesta por estribos de Ø6 en U, separados $s=15 \text{ cm (5.91 in)}$, que se corresponde con un área de refuerzo de $A_v=0.56 \text{ cm}^2 (=0.22 \text{ in}^2)$.

En primer lugar, comprobamos si la armadura de cortante existente en la viga cumple con los requerimientos de ACI 318, en nuestro caso se trata de estribos en dirección perpendicular al eje de la viga.

Separación máxima entre estribos:

$$s \leq \frac{d}{2}$$

$$s = 17.71 \text{ in} / 2 = \mathbf{8.85 \text{ in (22.50 cm)}} > \mathbf{5.91 \text{ in (15 cm)}} \rightarrow \mathbf{CUMPLE}$$

Mínimo área de refuerzo:

$$A_v = 0.75 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \frac{b_w \cdot s}{f_y}$$

$$A_v = 0.75 \cdot \sqrt{3.625 \text{ psi}} \cdot \frac{11.81 \text{ in} \cdot 5.91 \text{ in}}{58.000 \text{ psi}} =$$

$$= \mathbf{0.05 \text{ in}^2 (0.12 \text{ cm}^2)} < \mathbf{0.22 \text{ in}^2 (0.56 \text{ cm}^2)} \rightarrow \mathbf{CUMPLE}$$

Calculamos la resistencia del acero:

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s}$$

$$V_s = \frac{0.22 \text{ in}^2 \cdot 58.000 \text{ psi} \cdot 17.71 \text{ in}}{5.91 \text{ in}} = \mathbf{38.24 \text{ Kips (170.10 KN)}}$$

La resistencia a corte del acero mediante estribos colocados perpendicularmente al eje de la viga debe cumplir que:

$$V_s \leq 8 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$$

$$V_s = 38'24 \text{ Kips} \leq 8 \cdot \sqrt{3.625 \text{ psi}} \cdot 11'81 \text{ in} \cdot 17'71 \text{ in} = 100'74 \text{ Kips} \rightarrow \text{CUMPLE}$$

-Paso 4: Comprobación de resistencia.

$$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s \geq V_u$$

$$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s = 0'75 \cdot 18'89 + 0'75 \cdot 38'24 = 42'84 \text{ Kips (190'55 KN)}$$

$$V_u = 28'00 \text{ Kips (124'53 KN)}$$

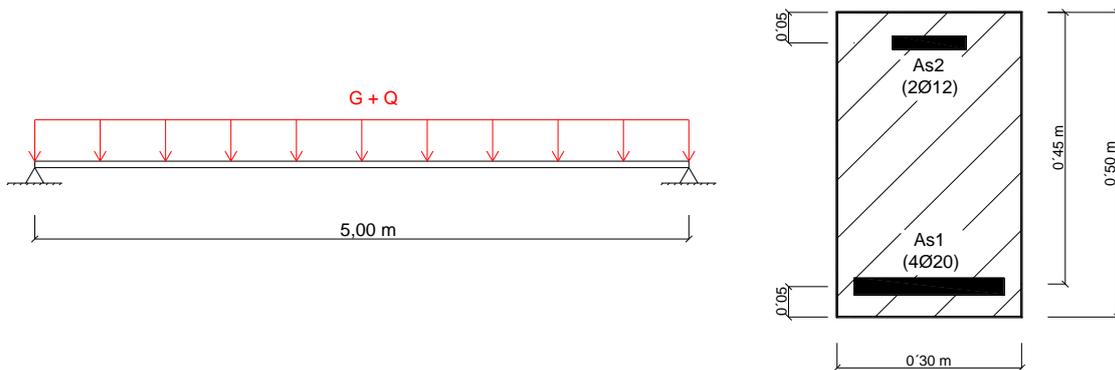
de modo que:

$$\phi V_n = 190'55 \text{ KN} > V_u = 124'53 \text{ KN} \rightarrow \text{CUMPLE}$$

La capacidad resistente a cortante del hormigón y acero es mayor que la sollicitación a cortante, por lo que no es necesario reforzar la viga.

7.4 - DISEÑO DE REFUERZO A FLEXIÓN MEDIANTE Bulletin 14, FIB

Partiendo de la situación inicial del caso práctico, vamos a diseñar el refuerzo mediante laminado de fibra de carbono con el procedimiento de la guía de diseño Bulletin 14 de FIB. En los cálculos preliminares del caso hemos diseñado el armado correspondiente a la viga y justificado la necesidad de refuerzo ante el cambio de uso previsto en el edificio.



Datos:

Hormigón, $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$

$G = 20 \text{ KN/m}$

Acero, $f_{yk} = 400 \text{ MPa}$

$Q = 15 \text{ KN/m}$

Procedimiento de Bulletin 14 de FIB:

-Paso 1: Antes de aplicar la sobrecarga en el elemento, determinar el momento resistente de diseño en estado límite último.

En base al Eurocódigo 2, aplicamos los coeficientes correspondientes de mayoración de cargas:

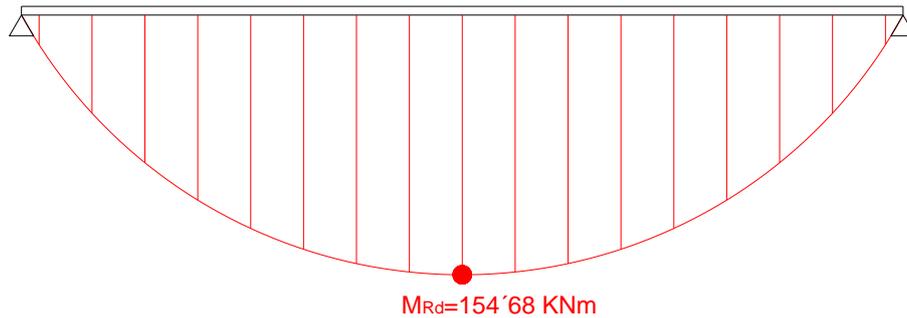
$$G = 20 \text{ KN/m} \cdot 1,35 \text{ (coef. Permanentes)} = 27 \text{ KN/m}$$

$$Q = 15 \text{ KN/m} \cdot 1,50 \text{ (coef. Variables)} = 22,50 \text{ KN/m}$$

$$\text{TOTAL} = 49,50 \text{ KN/m}$$

Procedemos ahora al cálculo del momento resistente de diseño, M_{Rd} :

$$M_{Rd} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{49,50 \cdot 5^2}{8} = 154,68 \text{ KNm}$$



·Paso 2: Para el momento de servicio M_o antes de la sobrecarga, determinar la deformación inicial ϵ_0 en la fibra extrema a tracción.

Tomando como base la sección fisurada porque normalmente $M_o \geq M_{cr}$ (momento de fisuración), la profundidad del eje neutro x_o puede resolverse de:

$$\frac{1}{2} b \cdot x_o^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_o - d_2) = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_o)$$

En primer lugar, hallamos el valor de α_s consultando el Eurocódigo 2:

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200.000 \text{ N/mm}^2}{30.500 \text{ N/mm}^2} = 6'55$$

$$\frac{1}{2} 300 \cdot x_o^2 + (6'55 - 1) \cdot 226'20 \cdot (x_o - 50) = 6'55 \cdot 1.257 \cdot (450 - x_o)$$

$$x_o = 129'98 \text{ mm}$$

A continuación, calculamos el momento de inercia de la sección fisurada que será necesario para calcular la deformación del hormigón ϵ_{co} :

$$I_{o2} = \frac{b \cdot x_o^3}{3} + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_o - d_2)^2 + \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_o)^2$$

$$I_{o2} = \frac{300 \cdot 129'98^3}{3} + (6'55 - 1) \cdot 226'2(129'98 - 50)^2 + 6'55 \cdot 1.257(450 - 129'98)^2$$

$$I_{o2} = 1.070.829.653 \text{ mm}^4$$

La deformación del hormigón en la cara comprimida de la sección se representa en la ecuación. El momento de servicio corresponde al momento en el instante de la colocación del refuerzo, donde sólo se incluye la carga permanente sin mayorar, antes de la sobrecarga:

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_o \cdot x_o}{E_c \cdot I_{o2}}$$

donde:

$$M_o = \frac{G \cdot L^2}{8} = \frac{20 \text{ Kn/m} \cdot 5^2 \text{ m}}{8} = 62'50 \text{ KNm} = 62.500.000 \text{ Nmm}$$

$$\varepsilon_{co} = \frac{62.500.000 \text{ Nmm} \cdot 129'98 \text{ mm}}{30.500 \text{ N/mm}^2 \cdot 1.070.829.653 \text{ mm}^4} = 2'4873 \cdot 10^{-4}$$

Por último, mediante compatibilidad de deformaciones, calculamos la deformación del hormigón en la fibra extrema a tracción:

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{co} \cdot \frac{h - x_o}{x_o}$$

$$\varepsilon_o = (2'4873 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{500 \text{ mm} - 129'98 \text{ mm}}{129'98 \text{ mm}} = 7'0807 \cdot 10^{-4}$$

Esta deformación equivale a la deformación inicial a nivel del CFRP en la sección (Fig.7.6):

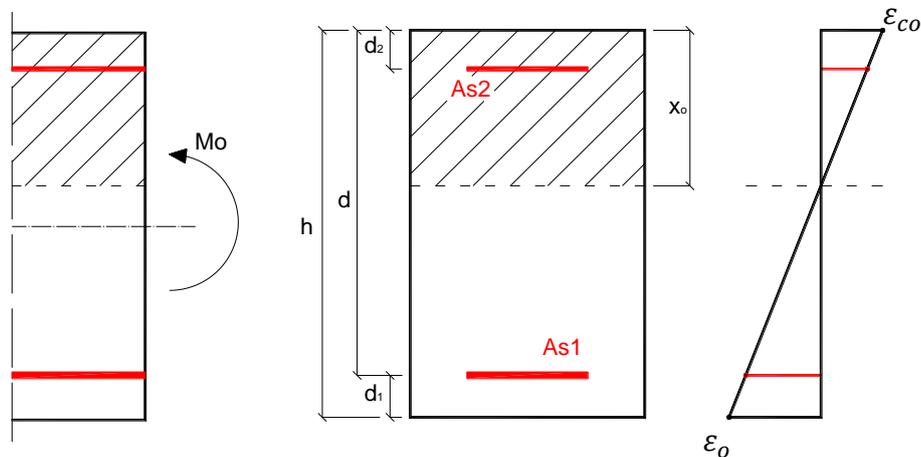


Figura 7.6 Situación inicial

-Paso 3: Asumir acción compuesta completa y determinar con el momento resistente de diseño después de la sobrecarga la sección de refuerzo FRP requerida para cumplir ELU. Verificar que se obtiene suficiente ductilidad.

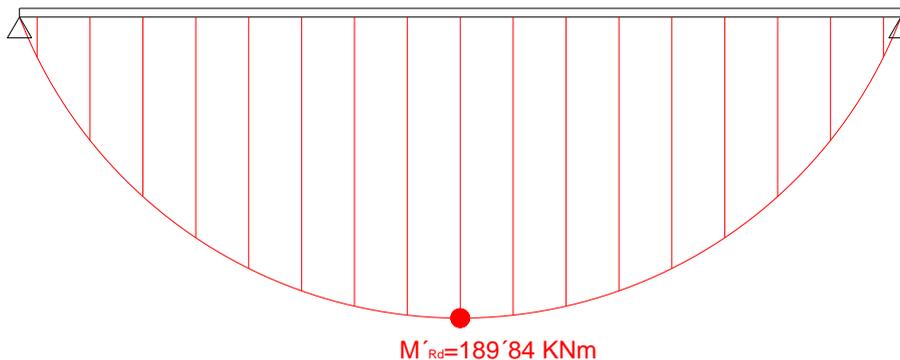
Según FIB, el principio de trabajo deseable es alcanzar el límite elástico del acero seguido del aplastamiento del hormigón y así realizaremos el cálculo. Comenzamos con el momento después de la sobrecarga, con el incremento de cargas variables:

$$G=20 \text{ KN/m} \cdot 1'35 \text{ (coef. Permanentes)}= 27 \text{ KN/m}$$

$$Q'=15 \text{ KN/m} \cdot 1'50 = 22'50 \text{ KN/m} \longrightarrow 22'50 \cdot 1'50 \text{ (coef. Variables)}= 33'75 \text{ KN/m}$$

$$\text{TOTAL} = 60'75 \text{ KN/m}$$

$$M'_{Rd} = \frac{q' \cdot L^2}{8} = \frac{60'75 \cdot 5^2}{8} = 189'84 \text{ KNm}$$



Ya hemos justificado la necesidad de refuerzo para esta sollicitación, de modo que se propone la colocación de un refuerzo mediante laminado de fibra de carbono adherido a la cara traccionada de la viga, el mismo que hemos diseñado con la guía ACI-440 y que tiene estas propiedades:

- Espesor (t_f): 1'20 mm; ancho (b_f): 50'00 mm; sección (A_f): 60'00 mm²
- Resistencia Última a Tracción (f_{fu}): 3'10 KN/mm²
- Deformación de Rotura (ϵ_f): 0'017
- Módulo de Elasticidad (E_f): 165 KN/mm²

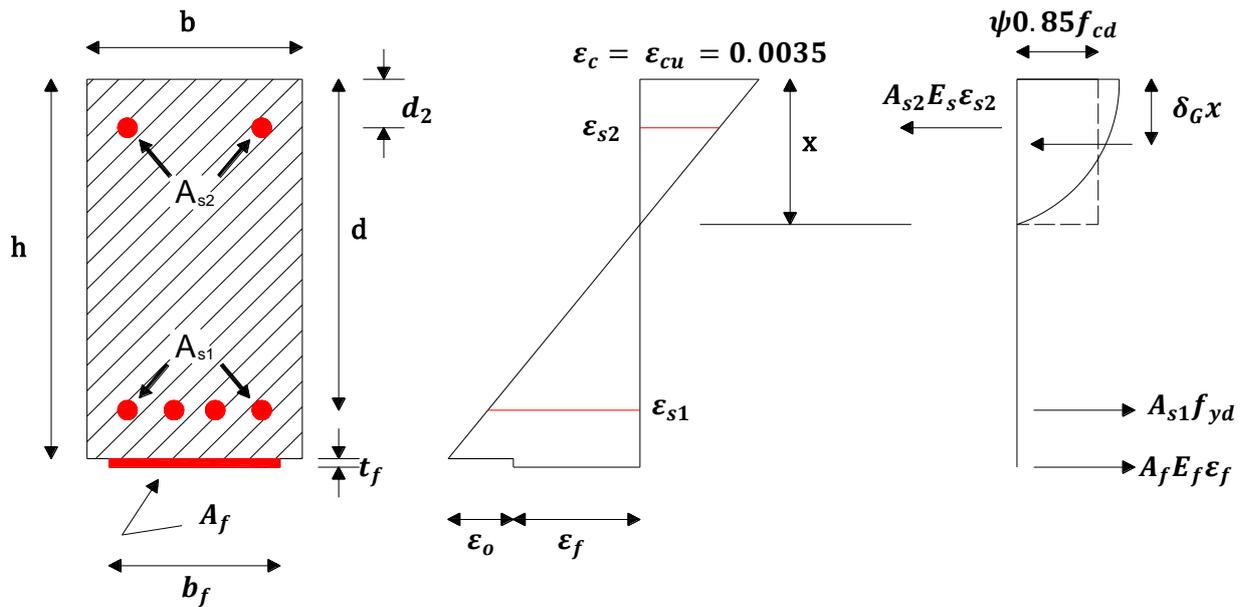


Figura 7.7 Análisis de la sección para estado límite último a flexión

La capacidad del momento flector de diseño debe calcularse hallando en primer lugar la profundidad del eje neutro, x :

$$0.85 \cdot \psi \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f$$

donde:

ψ : 0.80

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (E_s \varepsilon_{s2} \leq f_{yd})$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o$$

Para resolver la profundidad del eje neutro, partiremos de un valor estimado que introduciremos en primer lugar en las ecuaciones para hallar las deformaciones en el acero de compresión y en el laminado. Calculados estos valores, los introduciremos en la ecuación del eje neutro para hallar el valor del mismo, que debe coincidir con el anterior. Se trata de un proceso de iteración hasta alcanzar el valor de x que satisfaga el principio en estado límite último de compatibilidad de deformaciones y equilibrio interno de fuerzas (ver Fig. 7.7).

En primer lugar, vamos a estimar una profundidad del eje neutro de $x=90 \text{ mm}$ (como hicimos en el método de ACI 440, $x=0.20 \cdot d$).

$$\varepsilon_{s2} = 0'0035 \cdot \frac{90 - 50}{90} = 1'55 \cdot 10^{-3}$$

$$(200.000 \cdot 1'55 \cdot 10^{-3} = 310 \text{ MPa} < f_{yd} = 347'83 \text{ MPa})$$

$$\varepsilon_f = 0'0035 \cdot \frac{500 - 90}{90} - (6'98693 \cdot 10^{-4}) = 0'0152$$

Introducimos los valores en la ecuación del eje neutro:

$$0'85 \cdot 0'80 \cdot 16'67 \cdot 300 \cdot x + 226'2 \cdot 310 = 1.257 \cdot 347'83 + 60 \cdot 165.000 \cdot 0'0152$$

$$x = 152'20 \text{ mm} \neq 90 \text{ mm}$$

No es correcta la primera propuesta de profundidad del eje neutro. Vamos a estimar como segunda propuesta, $x=132 \text{ mm}$:

$$\varepsilon_{s2} = 0'0035 \cdot \frac{132 - 50}{132} = 2'17 \cdot 10^{-3}$$

$$(200.000 \cdot 2'17 \cdot 10^{-3} = 434 \text{ MPa} > f_{yd} = 347'83 \text{ MPa, tomamos } f_{yd})$$

$$\varepsilon_f = 0'0035 \cdot \frac{500 - 132}{132} - (6'98693 \cdot 10^{-4}) = 0'009058$$

Introducimos los valores en la ecuación del eje neutro:

$$0'85 \cdot 0'80 \cdot 16'67 \cdot 300 \cdot x + 226'2 \cdot 347'83 = 1.257 \cdot 347'83 + 60 \cdot 165.000 \cdot 0'009058$$

$$x = 131'80 \text{ mm} = 132 \text{ mm}$$

Ya tenemos la profundidad del eje neutro en ELU, donde el acero a compresión trabaja en régimen plástico y la deformación del laminado es inferior a la deformación límite del acero (10‰). Calculamos el momento resistente de diseño:

$$M_{Rd} = A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot (d - \delta_G \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \delta_G \cdot x) + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} \cdot (\delta_G \cdot x - d_2)$$

donde:

$$\delta_G: 0'40$$

$$M_{Rd} = 1.257 \cdot 347'83 \cdot (50 - 0'4 \cdot 132) + 60 \cdot 165.000 \cdot 0'009058 \cdot (500 - 0'4 \cdot 132) + 226'2 \cdot 347'83 \cdot (0'4 \cdot 132 - 50) = 213.987.299 \text{ Nmm}$$

$$M_{Rd} = 213'98 \text{ KNm} > M'_d = 189'84 \text{ KNm} \rightarrow \text{CUMPLE}$$

El momento resistente de la sección de la viga con el refuerzo laminado CFRP es superior que la sollicitación a la que está sometida. El refuerzo de fibra de carbono de 50 mm. es correcto e irá colocado en el eje de la cara inferior de la viga. Tal y como indica el bulletin 14, para viga simplemente apoyada, el laminado se colocará en toda la longitud de la viga, hasta una distancia del soporte no mayor de 50 mm.

Para que todo el procedimiento sea válido, comprobamos las siguientes ecuaciones del límite elástico del acero trabajando a tracción y la deformación del laminado CFRP, que debe ser inferior a la deformación última.

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

$$\epsilon_{s1} = 0'0035 \cdot \frac{450 - 132}{132} \geq \frac{347'83}{200.000}$$

$$\epsilon_{s1} = 8'43 \cdot 10^{-3} > 1'74 \cdot 10^{-3} \rightarrow \text{CUMPLE}$$

$$\epsilon_f = \epsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \epsilon_o \leq \epsilon_{fud}$$

$$\epsilon_f = 0'0035 \cdot \frac{500 - 132}{132} - (6'98693 \cdot 10^{-4}) \leq 0'017$$

$$\epsilon_f = 0'009058 \leq 0'017 \rightarrow \text{CUMPLE}$$

El último apartado de este paso corresponde en verificar que se obtiene suficiente ductilidad. Según el criterio de ductilidad de FIB, efectivamente debemos comprobar porque:

$$M_{Rd} = 213'98 \text{ KNm} < 1'2 \cdot M'_d = 227'81 \text{ KNm}$$

Comprobamos:

$$\xi \leq 0'45, \text{ para hormigón HA - 25}$$

$$\xi = x/d = 132 \text{ mm}/450 \text{ mm} = 0'293 < 0'45 \rightarrow \text{CUMPLE}$$

·Paso 4: Calcular las tensiones en el hormigón, en acero y refuerzo CFRP en estado límite de servicio. Si las tensiones permitidas son superadas, determinar la sección del refuerzo para cumplir los requerimientos de limitación de tensiones.

- Limitación para prevenir excesiva tensión en el hormigón comprimido:

$$\sigma_c \leq 0'60 \cdot f_{ck}, \text{ bajo combinación poco frecuente de cargas}$$

$$\sigma_c \leq 0'45 \cdot f_{ck}, \text{ bajo combinación cuasipermanente de cargas}$$

Para conocer el valor de $\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c$, debemos calcular la profundidad del eje neutro en estado límite de servicio, análisis lineal elástico, y posteriormente la combinación de acciones para calcular el valor de la tensión en el hormigón para cada una de ellas. Comenzamos con la profundidad del eje neutro, mediante equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones:

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_e^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_e - d_2) = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_e) + \alpha_f \cdot A_f \cdot \left[h - \left(1 + \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_c} \right) \cdot x_e \right]$$

donde:

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{165.000}{30.500} = 5'41$$

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200.000}{30.500} = 6'55$$

$$\left(1 + \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_c} \right) = 1$$

$$\frac{1}{2} 300x_e^2 + (6'55 - 1)226'2(x_e - 50) = 6'55 \cdot 1.257(450 - x_e) + 5'41 \cdot 60[500 - 1 \cdot x_e]$$

$$x_e = 132'25 \text{ mm}$$

En segundo lugar, procedemos a calcular las combinaciones de acciones en ELS. Para el cálculo, tomamos las cargas actuantes sin mayorar:

Combinación poco frecuente de cargas:

$$\Sigma Q_{k,j} + P + Q_{k,1} + \Sigma_{i>1} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

donde:

$\Sigma Q_{k,j}$: Valor característico de una acción permanente.

P : Valor representativo de una acción de pretensado.

$Q_{k,1}$: Valor característico de una acción variable 1.

$\Psi_{0,i} Q_{k,i}$: Valor característico de una acción variable i , minorada.

En nuestro caso, intervienen las acciones permanente y variable:

$$\Sigma Q_{k,j} + Q_{k,1} = 20 + 22'5 \text{ KN/m} = \mathbf{42'5 \text{ KN/m}}$$

Combinación cuasipermanente de cargas:

$$\Sigma Q_{k,j} + P + \Sigma_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

donde:

$\Sigma Q_{k,j}$: Valor característico de una acción permanente.

P : Valor representativo de una acción de pretensado.

$\Psi_{2,i} Q_{k,i}$: Valor característico de una acción variable i , minorada.

En nuestro caso, interviene la acción permanente y la acción variable que en este caso está minorada por el coeficiente $\Psi_2 = 2$, como corresponde al uso residencial (Categoría A) de nuestro caso, según tabla A.1.1 del Eurocódigo 1.

$$\Sigma Q_{k,j} = 20 + 0'30 \cdot 22'5 \text{ KN/m} = \mathbf{26'75 \text{ KN/m}}$$

Calculado el eje neutro, tenemos dos valores de $\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c$ en función de la combinación de acciones. Comprobamos de esta forma si cumple la exigencia de ELS:

Combinación poco frecuente de cargas:

$$E_c \cdot \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_e \cdot \left(1'05 \cdot d - \frac{x_e}{3}\right)}$$

donde:

$$M_{k,poco\ freq} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{42'5 \cdot 5^2}{8} = \mathbf{132'81 \text{ KNm} = 132.810.000 \text{ Nmm}}$$

$$E_c \cdot \varepsilon_c = \frac{132.810.000}{\frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 132'25 \cdot \left(1'05 \cdot 450 - \frac{132'25}{3}\right)} = \mathbf{15'62 \text{ N/mm}^2}$$

$$\sigma_c = \mathbf{15'62 \text{ N/mm}^2} \leq 0'60 \cdot f_{ck} = 0'60 \cdot 25 = \mathbf{15 \text{ N/mm}^2}$$

$$\sigma_c = \mathbf{15'62 \text{ N/mm}^2} > \mathbf{15 \text{ N/mm}^2}$$

En la comprobación en estado de servicio para una combinación de acciones poco frecuente, obtenemos un resultado ligeramente superior a la limitación para esta combinación. Analizando con detalle la situación, estamos hablando de que existe una probabilidad muy baja, del 4'16%, de ser superada la limitación de tensiones en el hormigón en servicio cuando se cumpla la situación de máxima carga, siendo ésta además un caso de combinación de acciones poco frecuente. Dicho esto, podemos dar por bueno el refuerzo calculado en la comprobación en ELS dada la baja probabilidad y el amplio margen en las tensiones de 15'62 N/mm² para un hormigón HA-25.

Combinación cuasipermanente de cargas:

$$E_c \cdot \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_e \cdot \left(1'05 \cdot d - \frac{x_e}{3}\right)}$$

donde:

$$M_{k,cuasiperm} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{26'75 \cdot 5^2}{8} = 83'6 \text{ KNm} = 83.600.000 \text{ Nmm}$$

$$E_c \cdot \varepsilon_c = \frac{83.600.000}{\frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 132'25 \cdot \left(1'05 \cdot 450 - \frac{132'25}{3}\right)} = 9'84 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = 9'84 \text{ N/mm}^2 \leq 0'45 \cdot f_{ck} = 0'45 \cdot 25 = 11'25 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = 9'84 \text{ N/mm}^2 < 11'25 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{CUMPLE}$$

En el caso de combinación de acciones cuasi permanente, el refuerzo cumple holgadamente con la limitación.

- Limitación para prevenir alcanzar el límite elástico del acero:

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_c \cdot \frac{d - x_e}{x_e} \leq 0'80 \cdot f_{yk}, \text{ bajo combinación poco frecuente de cargas}$$

donde:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_{c,poco\ freq}}{E_c} = \frac{15'62 \text{ N/mm}^2}{30.500 \text{ N/mm}^2} = 5'12 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma_s = 200.000 \cdot (5'12 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{450 - 132'25}{132'25} = 246'03 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 246'03 \text{ N/mm}^2 \leq 0'80 \cdot f_{yk} = 0'80 \cdot 347'83 = 278'26 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 246'03 \text{ N/mm}^2 < 278'26 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{CUMPLE}$$

- Limitación en las tensiones en refuerzo CFRP bajo cargas de servicio:

$$\sigma_f = E_f \cdot \left(\varepsilon_c \cdot \frac{h - x_e}{x_e} - \varepsilon_o \right) \leq \eta \cdot f_{fk}, \text{ bajo combinación cuasipermanente de cargas}$$

donde:

$\eta = 0'80$, para refuerzo mediante fibra de carbono.

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_{c,cuasiperm}}{E_c} = \frac{9'84 \text{ N/mm}^2}{30.500 \text{ N/mm}^2} = 3'22 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma_f = 165.000 \cdot \left((3'22 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{500 - 132'25}{132'25} - (7'0807 \cdot 10^{-4}) \right) = 30'91 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_f = 30'91 \text{ N/mm}^2 \leq \eta \cdot f_{fk} = 0'80 \cdot 3.100 = 2.480 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_f = 30'91 \text{ N/mm}^2 < 2.480 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{CUMPLE}$$

Dado que, como se observa en el resultado, se esperan pocas deformaciones en el refuerzo bajo carga de servicio, no es de preocupación la rotura por fluencia del mismo.

La viga con el refuerzo laminado CFRP propuesto satisface también las limitaciones de tensiones en estado límite de servicio.

7.5.2 - Cálculo de la resistencia a cortante

-Paso 1: Cálculo de la fuerza cortante mayorada.

$$V_{sd} = q \cdot L/2$$

$$V_{sd} = 60'75 \text{ KN/m} \cdot 5 \text{ m}/2 = 151'88 \text{ KN, en el apoyo}$$

A una distancia d desde el apoyo, resulta:

$$V_{sd} = (q \cdot L/2) - q \cdot d$$

$$V_{sd} = (60'75 \cdot 5 / 2) - 60'75 \cdot 0'45 = 124'53 \text{ KN, en distancia} = d$$

Éste valor de cortante último es el que aplicaremos en el cálculo para la comprobación de resistencia. La necesidad de refuerzo de refuerzo se comprueba mediante:

$$V_{sd} > V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd}$$

donde:

V_{Rd3} : Resistencia de cálculo a cortante de una sección, en aquellas piezas con armadura de cortante.

V_{cd} : Capacidad a cortante de la zona comprimida de hormigón.

V_{wd} : Contribución de la armadura de cortante.

Si la sollicitación es mayor que la suma de resistencia a cortante del hormigón y del armado a corte, será necesario disponer de refuerzo.

-Paso 2: Contribución del hormigón. Mediante el cálculo del hormigón, se va a justificar que el elemento, la viga, requiere de la armadura a cortante para hacer frente a la sollicitación, dado que la formulación del hormigón equivale a la de elementos que no requieren armadura de cortante:

$$V_{Rd1} = V_{cd} = [\tau_{Rd} \cdot k(1'2 + 40 \cdot P_l) + 0'15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

donde:

V_{Rd1} : Resistencia de cálculo a cortante de una sección en aquellas piezas sin armadura de cortante.

τ_{Rd} : Resistencia de cálculo básica a cortante. Los valores aparecen en la tabla 4.8 del Eurocódigo 2, en nuestro caso, para hormigón $f_{ck} = 25$.

k : Coeficiente de valor igual a $1.6 - d \geq 1$ (d en metros).

$P_t: \frac{A_{st}}{b_w \cdot d} \leq 0.02$, Parámetro de relación entre el área de armadura a tracción y las dimensiones de la sección.

σ_{cp} : Coeficiente de esfuerzo axial ($=0$, no interviene en nuestro caso).

$$V_{cd} = \left[0.30 \frac{N}{mm^2} \cdot (1.6 - 0.45) \left(1.2 + 40 \cdot \frac{1.257 mm^2}{300 \cdot 450 mm} \right) + 0.15 \cdot 0 \right] \cdot 300 \cdot 450 mm =$$

$$V_{cd} = 73.24 KN$$

$$V_{Rd1} = V_{cd} = 73.24 KN < V_{Sd} = 124.53 KN$$

La contribución únicamente del hormigón no es suficiente para resistir el esfuerzo cortante, por lo que se requiere añadir la armadura de cortante para la comprobación.

-Paso 3: Contribución de la armadura de cortante compuesta por estribos $\varnothing 6$, separados una distancia de 150 mm. En primer lugar, vamos a comprobar que la armadura de cortante existente cumple la armadura mínima que establece el Eurocódigo 2. En este caso, para estribos verticales perpendicular al eje de la viga.

En la tabla 5.5 del Eurocódigo 2 se establece que para un hormigón HA-25 (C25/30) y una armadura de acero 400 N/mm², el valor mínimo de la cuantía de armadura de cortante es $\rho_w = 0.0013 mm^2$.

En nuestro caso, tenemos:

$$\rho_w = 0.56 mm^2 > 0.0013 mm^2 \rightarrow \text{Cumple}$$

Calculamos la contribución de ésta armadura:

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0.90 \cdot d \cdot f_{ywd}$$

donde:

A_{sw} : Área de la sección transversal de la armadura de cortante.

s : Separación entre estribos.

f_{ywd} : Límite elástico de cálculo de la armadura de cortante.

$$V_{wd} = \frac{56 \text{ mm}^2}{150 \text{ mm}} \cdot 0'90 \cdot 450 \text{ mm} \cdot 347'83 \text{ N/mm}^2 = 52'59 \text{ KN}$$

Paso 4: Comprobación de resistencia.

$$V_{Rd1} = V_{cd} + V_{wd} = 73'24 + 52'59 \text{ KN} = 125'83 \text{ KN} > V_{sd} = 124'54 \text{ KN}$$

La capacidad conjunta del hormigón y la armadura existente de cortante es superior a la sollicitación de cortante de la viga, no es necesario refuerzo.

7.6 - NOTACIÓN

7.6.1 - Notación ACI 440

A_f = $n \cdot E_f \cdot t_f$, área de refuerzo externo FRP.

A_s = área de armadura de acero.

A_v = área del acero a corte

a_θ = profundidad del diagrama de tensiones equivalentes.

b = ancho de la sección rectangular de hormigón.

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro.

C_E = factor reductor en función del ambiente.

d = canto útil.

E_c = módulo de elasticidad del hormigón.

E_f = módulo de elasticidad a tracción del FRP.

E_s = módulo de elasticidad del acero.

f'_c = resistencia característica del hormigón.

$f_{c\theta}$ = resistencia del hormigón a temperaturas elevadas.

- f_f = tensión en el refuerzo FRP.
- f_{fe} = tensión eficaz en el FRP.
- f_{fu}^* = resistencia última a tracción del FRP indicada por el fabricante.
- f_{fu} = resistencia última a tracción de diseño del FRP.
- f_s = tensión en el acero.
- $f_{s,s}$ = tensión en el acero bajo cargas de servicio.
- f_y = resistencia característica del acero.
- $f_{y\theta}$ = resistencia del acero a temperaturas elevadas.
- h = altura total del elemento.
- I_{cr} = momento de inercia de la sección de la sección fisurada.
- k = ratio de la profundidad del eje neutro a la profundidad del refuerzo medido en la misma cara del eje neutro.
- l = luz del vano.
- M_{cr} = momento de fisuración.
- M_n = momento nominal.
- M_u = momento mayorado.
- n = número de laminados de refuerzo FRP.
- s = separación entre estribos.
- t_f = espesor nominal de un laminado FRP.
- V_c = resistencia a cortante del hormigón.
- V_n = fuerza cortante nominal.
- V_s = resistencia a cortante del acero (estribos).
- V_u = fuerza cortante mayorada.
- w = ancho del elemento.
- w_f = ancho del laminado FRP.
- w_u = carga mayorada por unidad de longitud de la viga.
- β_1 = ratio de la profundidad del diagrama de deformaciones equivalentes y la profundidad del eje neutro.
- ε_{bi} = deformación en el sustrato de hormigón en el momento de aplicar el refuerzo.
- ε_c = deformación en el hormigón.
- ε_f = deformación en el refuerzo FRP.

- ε_{fe} = deformación eficaz en el FRP.
- ε_{fu}^* = deformación última de rotura del FRP.
- ε_{fu} = deformación de rotura de diseño del FRP.
- ε_s = deformación en el acero.
- ϕ = coeficiente reductor de resistencia.
- θ = coeficiente del fuego (efecto de elevadas T^{as}).
- γ = multiplicador de f'_c para determinar la intensidad de una distribución de deformaciones equivalentes en el hormigón.
- κ_m = coeficiente de dependencia del adhesivo a flexión.
- ρ_f = ratio de refuerzo FRP.
- ρ_s = ratio de acero.
- ψ_f = coeficiente reductor adicional de resistencia del FRP.

7.6.2 - Notación Bulletin 14, FIB

- A_s = área total de armadura longitudinal de acero.
- A_{s1} = área de armadura de acero a tracción.
- A_{s2} = área de armadura de acero a compresión.
- A_{sw} = área de la sección transversal de armadura de acero de cortante.
- b = ancho de la viga.
- b_f = ancho del refuerzo FRP.
- b_w = mínimo ancho de la sección por encima del canto útil.
- d = canto útil del elemento.
- d_1 = distancia desde el eje de la armadura de tracción hasta la fibra extrema a tracción.
- d_2 = distancia desde el eje de la armadura de compresión hasta la fibra extrema a compresión.
- E_c = módulo de elasticidad del hormigón.
- E_f = módulo de elasticidad del FRP.
- E_{fu} = módulo de elasticidad en estado último del FRP.
- E_s = módulo de elasticidad del acero.
- f_{cd} = resistencia a compresión de cálculo del hormigón.

- f_{ck} = resistencia a compresión característica del hormigón.
- f_f = resistencia a tracción del FRP.
- f_{fd} = resistencia a tracción de cálculo del FRP.
- f_{fk} = resistencia a tracción característica del FRP.
- f_y = límite elástico del acero.
- f_{yd} = límite elástico de diseño del acero.
- f_{yk} = límite elástico característico del acero.
- f_{ywd} = límite elástico de diseño del acero de corte.
- h = altura total del elemento.
- I_{o2} = momento de inercia de la sección fisurada antes de reforzar.
- l = luz del vano.
- M_{cr} = momento de fisuración
- M_d = momento de cálculo.
- M_k = valor característico del momento.
- M_o = momento actuante durante aplicación del refuerzo.
- M_{Rd} = momento resistente de diseño.
- s = separación de la armadura de cortante.
- t_f = espesor del FRP.
- V_{cd} = capacidad a cortante de diseño del hormigón.
- V_{Rd} = resistencia a cortante de diseño.
- V_{Rd1} = resistencia a cortante de diseño de un elemento sin acero a corte.
- V_{Rd3} = resistencia a cortante de diseño de un elemento con acero a corte.
- V_{Sd} = fuerza cortante de diseño.
- V_{wd} = contribución del acero de corte al diseño de la capacidad de cortante.
- x = profundidad de la zona de compresión.
- x_e = profundidad de la zona de compresión del análisis lineal elástico.
- x_o = profundidad de la zona de compresión antes de reforzar.
- ε_{co} = deformación inicial en la fibra extrema a compresión antes de reforzar.
- ε_{cu} = deformación última del hormigón.
- ε_f = deformación del FRP.

- ε_{fu} = deformación última del FRP.
- ε_{fud} = deformación última de cálculo del FRP.
- ε_{s1} = deformación del acero de tracción.
- ε_{s2} = deformación del acero de compresión.
- ε_o = deformación inicial en la fibra extrema a tracción antes de reforzar.
- ξ = profundidad relativa de la zona de compresión.
- σ_c = tensión en el hormigón.
- σ_f = tensión en el FRP.
- σ_s = tensión en el acero.
- τ_{Rd} = resistencia a cortante de diseño del hormigón.
- ψ = coeficiente de combinación de cargas.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

Se desglosan en dos apartados las conclusiones derivadas del desarrollo del presente trabajo. En primer lugar, en base a la información del estado del conocimiento de los materiales compuestos FRP para su aplicación en el refuerzo de estructuras. En segundo lugar, del estudio y análisis de un caso práctico de refuerzo de viga debido al incremento de cargas aplicando los procedimientos para el cálculo y diseño que aparecen en las guías ACI 440 y bulletin 14, FIB.

8.1 - SOBRE LA APLICACIÓN DE CFRP EN EL REFUERZO DE ESTRUCTURAS

- Los materiales compuestos aparecen como una alternativa eficaz y justificada a los refuerzos tradicionales de estructuras de hormigón mediante la adhesión externa sobre el elemento. Las excelentes características de los materiales compuestos, su capacidad de trabajo compatible con el hormigón y sus excelentes propiedades a largo plazo y en condiciones ambientales adversas constituyen una garantía en su aplicación. Un estudio previo exhaustivo del elemento a reforzar y el conocimiento de los múltiples sistemas de aplicación del material, permiten adoptar la solución de refuerzo más correcta en función del caso.
- Los materiales compuestos de resina epoxi reforzada con fibra de carbono son los de mayor aplicación en la ejecución de refuerzos de estructuras de hormigón armado. Esto se debe a las excelentes propiedades mecánicas de la fibra de carbono como elemento resistente, por encima de las fibras de vidrio y de aramida, con unos valores muy altos de resistencia a tracción y módulo de elasticidad en contraste con su baja densidad y ligereza.
- Los refuerzos de estructura mediante CFRP son una gran ventaja ante situaciones climáticas adversas, pueden utilizarse interior y exteriormente, no sufren patologías debidas a la corrosión y a los agentes químicos. Como nota a destacar es el caso del fuego, donde efectivamente el material CFRP debe ser protegido mediante un revestimiento ignífugo ante la pérdida de sus propiedades, de igual modo que sucede con los refuerzos mediante perfiles de acero.
- Los materiales CFRP destacan enormemente en su puesta en obra. Son materiales muy ligeros, de gran maniobrabilidad, capaces de adaptarse a la geometría del sustrato, su formato de comercialización permite su colocación sin juntas evitando puntos débiles y sus reducidas dimensiones una vez aplicado no afecta a la reducción de espacios, alturas y zonas de paso, incluso permite la posibilidad de pasar completamente desapercibido, sin generar un impacto visual. En los casos donde el planteamiento sea estrictamente económico, un estudio previo de la puesta en obra del refuerzo mediante CFRP permite la reducción de costes frente a los métodos tradicionales. Si bien la fibra de carbono es un material caro y la mano de obra para su aplicación debe ser especializada, la reducción importante de tiempos de trabajo y utilización de medios auxiliares más ligeros en el transporte, manejo y puesta en obra posibilitan unos precios muy competentes frente al resto de sistemas de refuerzos. Su elección es muy indicada para las aplicaciones en áreas públicas

- (para trabajo nocturno), puntos de mucha afluencia de gente y especialmente en obras donde se desee reducir las interrupciones de tráfico.
- Pese a que existen varios documentos a nivel mundial que se utilizan como guías para el cálculo y diseño de los refuerzos de hormigón armado mediante CFRP en el campo de la ingeniería y la construcción, no se ha implantado una norma particular para su aplicación. De este modo, se recomienda el estudio de las diferentes guías y la consulta con las empresas que comercializan los materiales CFRP para lograr el éxito en la intervención. Estas empresas ofrecen apoyo en fase de proyecto y durante la ejecución de los trabajos, siendo en este punto donde el técnico debe tener un mayor control y supervisión.
 - Aunque existen diversos métodos normalizados para la caracterización de los materiales constituyentes de los sistemas de refuerzo, como las fibras o resinas, y de los laminados que constituyen el elemento principal del sistema, no existe en general ningún procedimiento normalizado de ensayo del sistema de refuerzo. Por ello, es recomendable recurrir a procedimientos de cálculo contrastados o a métodos de análisis como elementos finitos.
 - El uso de materiales compuestos ofrece una amplia proyección futura, que incluyen la mejora de otras aplicaciones estructurales que existen en la actualidad:
 - Laminados pretensados.
 - Barras de fibra de carbono.
 - Nuevas fibras sintéticas.
 - Materiales compuestos híbridos.
 - Mejora de los adhesivos.
 - Nuevos métodos de anclaje.

8.2 - SOBRE LOS RESULTADOS DEL CASO PRÁCTICO

- Se ha calculado el caso práctico de refuerzo a flexión de una viga de hormigón armado mediante los procedimientos de las guías ACI 440 y bulletin 14, FIB debido a un incremento de las cargas variables por cambio de uso que puede aplicarse a un caso real. Hemos calculado el refuerzo a flexión puesto que se ha justificado que la viga existente no resiste las nuevas cargas y comprobado mediante ambos procedimientos que ésta estructura existente sí es capaz de soportar el incremento de esfuerzo cortante debido a la sobrecarga, de modo que no ha sido necesario reforzar para el nuevo cortante.
- En ambos procedimientos, el refuerzo propuesto de un laminado de 60 mm^2 aplicado externamente sobre la cara inferior de la viga ha resultado satisfactorio, de forma que del trabajo conjunto del hormigón, acero y refuerzo CFRP se obtiene un momento resistente superior a la solicitación. No obstante, los resultados obtenidos entre las dos guías varían en cierto modo.
- La guía ACI ofrece un planteamiento más restrictivo en lo referido a las propiedades de la viga existente antes del refuerzo, donde plantea la necesidad del cumplimiento inicial de una resistencia nominal mínima y una

resistencia al fuego que deben satisfacerse en el elemento existente para determinar que puede ser reforzado. De igual modo sucede en el cálculo del momento último mayorado que debe soportar la sección reforzada, donde siguiendo el procedimiento para el cálculo del valor que se debe cumplir en ACI se obtiene un resultado muy superior al valor del momento de sollicitación calculado según la guía FIB.

- Se acepta también que la guía ACI es más conservadora en la predicción de la capacidad portante del CFRP, debido principalmente a la aplicación de un coeficiente reductor de resistencia adicional = 0'85 en la contribución del refuerzo. Este hecho va a condicionar que la resistencia global de la estructura reforzada calculada según ACI sea inferior que el resultado obtenido en FIB. En resumen, podemos afirmar que la guía ACI apuesta más por los criterios de seguridad en la contribución del refuerzo CFRP.

$$\text{ACI 440: } \phi M_n = 209'35 \text{ KNm} > M_u = 207'03 \text{ KNm}$$

$$\text{FIB: } M_{Rd} = 213'98 \text{ KNm} > M'_d = 189'84 \text{ KNm}$$

- La ductilidad es otro fenómeno muy a tener en cuenta en el cálculo y que es tratado con diferente perspectiva por la guías. La guía ACI aplica un coeficiente reductor para el cálculo del momento resistente de la sección en función de la ductilidad, es decir, en función de la deformación del acero (Paso 11). Este coeficiente reductor de resistencia de ACI, se reduce a su vez también cuanto menor ductilidad presente la sección (mayor fragilidad), con lo que se minora en mayor medida la capacidad resistente global del elemento reforzado. Es decir, en ACI se sanciona la reducción de ductilidad del elemento con la reducción de su capacidad resistente. En el caso de FIB, se exige la verificación del requerimiento de ductilidad del elemento reforzado, una vez comprobada la validez en ELU (Paso 4). En este caso, FIB nos exige que se cumpla con una limitación para que el elemento se comporte siempre de manera dúctil, no permitiendo a la sección que trabaje de forma frágil. Como conclusión, podemos afirmar que ACI reduce las capacidades pero permite las secciones con baja ductilidad, y en el caso de FIB no se permite la baja ductilidad de la sección y se limita siempre a un valor mínimo que se debe cumplir.

$$\text{ACI 440: } \phi M_n, \text{ donde: } \phi = 0'90, \text{ para secciones dúctiles} \\ \phi = 0'70, \text{ para secciones frágiles}$$

$$\text{FIB: } \xi = x/d < 0'45$$

- La guía ACI introduce en su procedimiento el cálculo de la deformación eficaz del CFRP. Esta deformación está condicionada por el coeficiente de dependencia del adhesivo y el objeto de su aplicación es prevenir el despegue del laminado CFRP del sustrato de hormigón o desprendimiento del recubrimiento de hormigón puesto que las tensiones en el refuerzo pueden ser superiores a las soportadas por el hormigón. Dado que el CFRP tiene un comportamiento lineal hasta el fallo, el nivel de deformación dictará el nivel de tensión desarrollado en el refuerzo y mediante el cálculo de la deformación eficaz se controla que no exceda el nivel de tensión en el CFRP por encima del hormigón. Otro hecho que muestra que ACI se inclina más por el lado de la seguridad que FIB.
- La comprobación en estado límite de servicio para el caso concreto de viga en edificación mediante la guía ACI se realiza únicamente verificando las tensiones en el acero. FIB en cambio comprueba las tensiones en el acero, hormigón y refuerzo CFRP mediante un procedimiento de trabajo más exhaustivo basado en combinación de acciones y donde se aplican de nuevo coeficientes de minoración de resistencia de los materiales. Los resultados obtenidos de ambas guías en ELU cumplen con las limitaciones en ELS.
- La comprobación a cortante mediante las directrices en que se basan las guías ACI 440 y FIB, ACI 318 y Eurocódigo 2 respectivamente, del elemento existente son correctas en ambos casos, no siendo necesario el refuerzo a cortante en este caso. Ambos procedimientos son similares y están basados en la suma de las contribuciones a esfuerzo de corte del hormigón y acero por separado. En el caso de haber tenido que reforzar, también se plantean en ambas guías las mismas soluciones constructivas de refuerzo y un procedimiento de cálculo similar, con las mismas diferencias en el proceso de cálculo que hemos analizado en el caso de refuerzo a flexión.
- Ambas guías nos ofrecen un procedimiento de trabajo en definitiva acertado para el cálculo de refuerzo de vigas de hormigón a flexión, es decisión del técnico realizar el diseño y cálculo del refuerzo mediante uno u otro procedimiento, o los dos. Dada la ausencia de normativa en la actualidad, debemos basarnos en la documentación aportada por la experiencia e investigaciones, en las recomendaciones de las guías y consultar a las empresas que comercializan los materiales compuestos CFRP.
- El técnico debe calcular y analizar minuciosamente cada paso para obtener el resultado acertado de refuerzo y lograr el éxito en su intervención. La práctica de cálculo de refuerzo mediante CFRP ha demostrado que se debe estudiar cada caso de forma individual y se debe tener muy en cuenta el comportamiento de cada material y su contribución frente a los esfuerzos a los que está sometido el elemento. El refuerzo mediante CFRP supone un cambio en la forma de trabajo de la sección de hormigón armado existente que se debe controlar. Cabe destacar que el caso práctico planteado se ha resuelto con varias propuestas de secciones más grandes de refuerzo, hasta secciones de 360 mm², con el resultado de que los momentos resistentes obtenidos no cumplen con la solicitud. Un exceso de refuerzo CFRP implica que la sección no trabaje de manera conjunta y se obtengan resultados incoherentes en la contribución de los materiales. Se han analizado los resultados paso a paso del cálculo y, a medida que se aumenta la sección de refuerzo, las

deformaciones en el acero se reducen, y con ellas, las tensiones en el mismo. Es decir, el acero no colabora; la sección cambia su comportamiento de modo dúctil a frágil y todas las cargas son asumidas por el hormigón, en parte, y por el refuerzo, principalmente, necesitando excesivas secciones del mismo para cumplir con el requerimiento de cargas. En base a esta conclusión, podemos afirmar la necesidad de profundizar en el cálculo del refuerzo para obtener una sección de CFRP que optimice al máximo el rendimiento de los materiales y, a su vez, permita elaborar un presupuesto competente con la reducción de costes adicionales.

CAPÍTULO 9

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Las investigaciones y la experiencia de los materiales compuestos en el campo de la ingeniería y construcción han abierto y desarrollado nuevas soluciones para su aplicación en el refuerzo de estructuras de hormigón armado, mediante la aplicación de nuevas técnicas constructivas con unos materiales que ofrecen grandes ventajas desde el punto de vista teórico y en la ejecución práctica en obra.

En base al proceso de investigación del presente trabajo, tanto en el análisis del estado de conocimiento como la aplicación en la práctica, se proponen futuras líneas de investigación que como complemento del contenido de este estudio podrían ser abordadas en el futuro:

- Diseñar planes experimentales de ensayos de laboratorio de los materiales compuestos orientados a la obtención de resultados de resistencias a flexión y a cortante en elementos de hormigón armado, así como el análisis de los modos de fallo debidos al despegue del refuerzo, desprendimiento y fisuración del elemento y el estudio de nuevas propuestas de unión del refuerzo.
- Por otro lado, abordar la elaboración de planes experimentales de laboratorio para ensayos de resistencia al fuego y comportamiento ante temperaturas elevadas del material compuesto y el estudio de los diferentes revestimientos de protección.
- Trabajar en la realización de una propuesta de norma española para la aplicación de los materiales compuestos en el refuerzo de estructuras de hormigón armado, adecuada a las normativas vigentes en nuestro país EHE y CTE.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fédération Internationale du Béton, FIB (CEB-FIP). "Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures". 2001.
2. American Concrete Institute, ACI 440.2R-02. "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures". 2002.
3. American Concrete Institute, ACI 318-02. "Building code requirements for structural concrete". 2002.
4. American Concrete Institute, ACI 216.R-89. "Guide for determining the fire endurance of concrete elements". 1989.
5. American Concrete Institute, ACI 440.3R-04. "Guide test methods for FRPs for reinforcing or strengthening concrete structures". 2004.
6. UNE-EN 1992. "Eurocódigo 2. Proyecto de estructuras de hormigón". 2010.
7. UNE-EN 1991. "Eurocódigo 1. Acciones en estructuras". 2003.
8. Comisión Permanente del Hormigón. "Instrucción del hormigón estructural EHE". 2008.
9. P.K.Mallick. "Fiber-reinforced composites. Materials, manufacturing and design. Third edition". 2008.
10. L.C.Hollaway and M.B.Leeming. "Strengthening of reinforced concrete structures using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering". 2000.
11. Stephen W.Tsai. "Diseño y análisis de materiales compuestos (Trad. Antonio Miravete)". 1988.
12. F.Bencardino, G.Spadea and R.N.Swamy. "Design to repair/up-grade RC structures: The key to a successful utilization of CFRP laminates". Proc. 7th Int. Conf. Structural faults and repair. Edinburgh. 1997.
13. E.David, E.Ragneau, F.Buyle-Bodin. "Experimental analysis of flexural behavior of externally bonded CFRP reinforced concrete structures". Materials and structures, Vol.36. 2003.
14. Y.Dong, M.Zhao, F.Ansari. "Failure characteristics of reinforced concrete beams repaired with CFRP composites".
15. L.Tu, D.Kruger. "Engineering properties of epoxy resins used as concrete adhesives". ACI materials Journals. 1996.

16. P.J.Fanning, O.Kelly. "Ultimate response of RC beams strengthened with CFRP plates". Journal of composites for construction. 2001.
17. R.Martinez, J.Eugenio, D.Revuelta, E.Zaballa. "Refuerzo de estructuras mediante fibras de carbono". Asociación de Consultores Independientes de Estructuras de Edificación, ACIES.
18. H.N. Garden, L.C.Hollaway, A.M.Thorne. "A preliminary evaluation of carbon fiber reinforced polymer plates for strengthening reinforced concrete beams". 1997.
19. A.R.Hutchinson, H.Rahimi. "Flexural strengthening of concrete beams with externally bonded FRP reinforcement". 2nd International Conference on Advanced Composites Materials in bridges and Structures. Canadian Society for civil Engineering. 1996.
20. B.P.Hearing. "Delamination in reinforced concrete retrofitted with fiber reinforced plastics". Massachusetts Institute of Technology. 2000.
21. W.M.Sebastian,D.Kim. "Parametric study of bond failure in concrete beams strengthened with fiber reinforced polymer plates". Magazine of concrete research. 2002.
22. M.Chajes, T.Thomson, J.Farschman. "Durability of concrete beams externally reinforced with composite fabrics". Construction and building materials. 1995.
23. P.S.Luke. "Analytical and numerical solutions to structural strengthening of beams by plate bonding".
24. F.Lee, A.Torres, J.Terán, M.Martinez. "Caracterización de un sistema de refuerzo-protección en elementos de hormigón armado dañados por corrosión, utilizando compuestos base fibra de carbono". Publicación técnica. 2006.
25. A.Arteaga y A.de Diego. "Los composites plásticos en la arquitectura como factores de creatividad, innovación y competitividad". Instituto de ciencias de la construcción E.Torroja-CSIC. 2009.
26. L.Stella y L.Vanegas. "Falla de los materiales compuestos laminados". Scientia et technica. 2004.
27. H.Chalaye. "Los materiales compuestos. Dinamismo e innovación". Les 4 pages des statistiques industrielles. 2002.
28. D.Revuelta. "Ejemplos de aplicación de los materiales compuestos a la construcción". Instituto Eduardo Torroja. 2002.

29. A.J.Lamanna, L.C.Bank, D.W.Scott. "Flexural strengthening of reinforced concrete beams by mechanically attaching fiber-reinforced polymer strips". Journal of composites for construction. 2004.
30. J.C. López Gonzalez. "Estudio de los modos de fallo de la adherencia FRP-Hormigón". E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la UPM. 2009.
31. A.Berenguel, C.Cots. "Empleo de fibra de carbono para incrementar la resistencia de estructuras de hormigón". Jornada nuevas técnicas de evaluación estructural, rehabilitación y refuerzo de estructuras de hormigón. Madrid. 1999.