

Criterios para el dimensionamiento

Refuerzo de estructuras mediante adhesión externa de polímeros reforzados con fibra de carbono, vidrio y aramida FRP y sistemas SRG y SRP con acero al carbono y acero inoxidable

Sistemas Kimitech / Kimisteel

INTRODUCCION

En España existe un parque de estructuras tanto en obras de edificación como civiles, que requiere de su adecuación al uso y reparación debido a la degradación, actualización a nuevas normativas, cambios de uso, etc. Para dar respuesta a estas exigencias surge el refuerzo mediante platabandas de acero, pero debido a su alto coste de fabricación al ser elementos muy pesados, dificultosa colocación y rápido deterioro por corrosión, su uso queda limitado.

Más recientemente (hace 25 años aprox.) aparecen los sistemas Kimitech: polímeros reforzados con fibras (FRP – *fiber reinforced polymer*) como sustitutivo a las platabandas de acero.

El atractivo de los refuerzos con materiales compuestos reside en su alta resistencia a la tracción y durabilidad (resistentes a la corrosión), propiedades muy interesantes vs. los refuerzos tradicionales de platabandas de acero. A esto debemos añadir una alta relación resistencia/peso que proporciona unos materiales muy manejables y rápidos de colocar. Por todo ello el refuerzo de estructuras de hormigón es el campo de la construcción donde más rápido y con mayor éxito se están aplicando los nuevos materiales compuestos Kimitech (polímeros armados con fibras o FRP). Los refuerzos con FRP Kimitech se realizan de forma muy rápida, con pocos operarios y con medios auxiliares ligeros, minimizándose las interrupciones del uso de la estructura y las molestias de los usuarios. La aplicación de estos materiales se traduce en un ahorro en coste de mano de obra respecto a los refuerzos tradicionales, en torno al 40-50%, hecho que compensa con creces el coste de la materia prima y añade la ausencia de mantenimiento requerido.

De la misma forma los nuevos sistemas de refuerzo con materiales compuestos SRG y SRP Kimisteel (*steel reinforced grout* y *steel reinforced polymer*) se guiarán en su dimensionamiento por los mismos criterios, ya que no existe ninguna variación en el criterio sino solo en los materiales utilizados.

CAMPOS DE APLICACIÓN

Un refuerzo estructural mediante un sistema en base a fibras de carbono comprende los refuerzos frente a esfuerzos flectores, cortantes y confinamiento. Al ser productos anisótropos que trabajan en una sola dirección y únicamente absorben tracciones, deberán de disponerse en las zonas traccionadas de los elementos que se refuercen.

Como ejemplo se utilizan en:

- Defectos de proyecto y/o ejecución
- Rehabilitación de estructuras
- Cambios de uso que conlleven un incremento de cargas
- Adaptación a nuevas normativas
- Reparación de estructuras dañadas con pérdida de sección resistente (corrosión)

Tipo de estructuras:

- Obra civil:
 - Puentes, viaductos: pilas, tableros, vigas ...
 - Depósitos y chimeneas
- Obra de edificación:
 - Forjados unidireccionales, reticulares, losa
 - Pilares
 - Vigas

FILOSOFIA DE DISEÑO DE UN REFUERZO

Las fibras de carbono tienen una alta resistencia a las altas temperaturas (+ 600°C). Sin embargo las resinas epoxy tienen el punto de transición vítrea entre los 60-100°C considerando lo que se especifica en las fichas técnicas Kimia.

Debido a la influencia de la temperatura en los refuerzos que utilizan una interfase de resina para su colaboración resistente existen dos posibilidades de dimensionar un refuerzo:

- Garantizar un coeficiente de resistencia residual mayor que 1 (resistencia del elemento / esfuerzo aplicado ambos en ELS). En este caso, garantizamos que ante una eventual pérdida de refuerzo en caso de incendio, el tiempo de resistencia al fuego estará únicamente determinado por el recubrimiento de la armadura
- Si el coeficiente de resistencia residual es inferior a 1 se deberá proteger el refuerzo frente a incendio para garantizar la resistencia al fuego según las normativas aplicables. En este sentido deberá asegurarse que el adhesivo no alcance su temperatura de transición vítrea.

En el caso de los sistemas SRG y SRP Kimisteel, ésta consideración no debe ser tomada en cuenta debido a que su resistencia al fuego suele ser superior a la del elemento reforzado.

BASES PARA EL DISEÑO DE REFUERZOS

El estado inicial del elemento a reforzar puede requerir de algún tipo de reparación que se deberá realizar mediante el procedimiento estándar de reparación del hormigón Kimia. Este deberá estar en perfectas condiciones cuando se vaya a aplicar el refuerzo y se deberá considerar en el diseño del refuerzo.

Los métodos de cálculo basados en los estados límite descritos en el EURO-CÓDIGO 2 así como en la EHE serán de aplicación en el diseño. Es importante conocer las leyes de esfuerzos de los diferentes estados de carga para evaluar el factor de seguridad residual y la sección requerida de refuerzo.

El dimensionamiento se basa en una sección transversal y en las prestaciones de los materiales principales de refuerzo (compuesto, hoja de fibra) descritos en las fichas técnicas del fabricante del sistema. Pero aplicando los factores de seguridad y tomando deformaciones de diseño (distintas de las características) descritos en la guía de diseño de refuerzo con materiales compuestos CEB-FIP.

Kimia Ibérica

Polígono III Moncada
C/Quinsá, nº 37
46113 Moncada (Valencia)

Tel. (+34) 96 139 99 17
Fax (+34) 96 139 98 33

www.kimiaiberica.es
info@kimiaiberica.es

REFUERZOS A FLEXION

En los cálculos de un refuerzo a flexión se asumen una serie de premisas (ACI 440-2R):

1. Diseño basado en la sección existente (dimensiones, materiales ...)
2. Las deformaciones en el hormigón y refuerzo de fibra son proporcionales a la distancia del eje neutro
3. El refuerzo externamente adherido está perfectamente adherido al hormigón
4. La deformación de cizalladura del adhesivo es despreciable ya que el espesor aplicado es mínimo
5. La deformación máxima del hormigón comprimido es del 3,5‰ (EHE)
6. La contribución del hormigón a tracción es despreciable

El refuerzo de fibra es perfectamente elástico hasta rotura. La disposición de una sección de fibra de carbono provoca una pérdida de la ductilidad del elemento. Por ello la CEB-FIP recomienda asegurar que la deformación de diseño debe ser como mínimo del 5‰ en hormigones de tipo igual o inferior a C35/45. Por otro lado los valores máximos recomendados de elongación de diseño llegan hasta el 7,5‰ (no se recomiendan valores superiores) según el estado de deformación del acero traccionado en el momento del refuerzo.

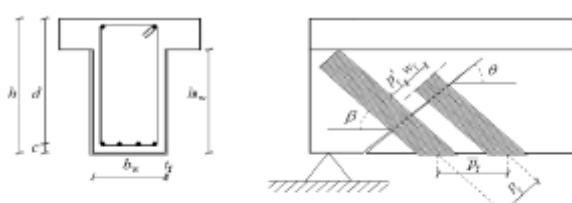
REFUERZOS A CORTANTE

Frente a un estado nuevo de cargas que conlleve un refuerzo a flexión es importante verificar al mismo tiempo la situación frente a esfuerzo cortante.

El refuerzo a cortante contribuye a modo de cerco externamente adherido y absorbe los esfuerzos de tracción producidos en el interior del elemento.

El modo de cálculo es simple utilizando el método de bielas y tirantes. La contribución del refuerzo V_f es aditivo al sumatorio de contribuciones. Hay que tener en cuenta la limitación de deformación de diseño (en torno al 4‰). 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.

Otro objetivo del refuerzo es interceptar las fisuras diagonales que se generan en este tipo de esfuerzos en dirección de las bielas de compresión, disponiendo dichos refuerzos en la dirección de los tirantes. La separación entre bandas de refuerzo está limitada a un máximo para tal fin.



$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,ct} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} > V_{Rd,max} \},$$

$$\text{ad U } V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{w_f}{P_f},$$

$$\text{ad U } f_{fed} = f_{fid} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min \{ 0.9 \cdot d, h_w \}} \right].$$

REFUERZOS POR CONFINAMIENTO

Este tipo de refuerzos se realiza para elementos sometidos a compresión a fin de mejorar su comportamiento frente a sismos (mejorar su ductilidad) o bien aumentar la capacidad portante.

El zunchado con materiales basados en fibra de carbono reduce la expansión lateral del elemento cuando éste está en compresión, llegando a un estado multi-axial de compresión. Un aumento de la capacidad portante de un elemento sometido a compresión es mayor cuanto menos es la ductilidad del refuerzo. Por esta razón, los refuerzos en base a fibra de carbono Kimitech son muy indicados en estos casos gracias a su alto módulo elástico en comparación con el del acero y su baja fluencia.

Tomar una deformación de diseño óptima es crucial tanto en este tipo de refuerzos como en los demás, ya que en una elongación del refuerzo mucho menor que la característica ya se produce la rotura del refuerzo. Al requerir ductilidades relativamente bajas se suelen recomendar deformaciones de diseño no superiores al 5%.

La verificación del elemento confinado (CNR-DT 200/2004) consiste en averiguar que el valor de proyecto del esfuerzo axial sea menor o igual a la resistencia de proyecto del elemento confinado. En ausencia de fenómenos de inestabilidad para cargas punta la resistencia del elemento confinado puede ser evaluado con:

$$N_{Rcc.d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd}$$

Donde f_{ccd} resistencia de cálculo del hormigón confinado vale:

$$f_{ccd} = f_{cd} + 2 \cdot 6 \cdot \left\langle \frac{f_{1eff}}{f_{cd}} \right\rangle^{2/3} \cdot f_{ed}$$

La presión de confinamiento eficaz f_{1eff} en función de la forma de la sección y de la modalidad de confinamiento, puede ser determinada por el producto entre un coeficiente de eficiencia, k_{eff} y la presión de confinamiento f_l

$$f_{1eff} = k_{eff} \cdot f_l$$

El coeficiente de eficiencia es igual al producto entre el coeficiente de eficiencia horizontal (en función de la geometría de la sección), el coeficiente de eficiencia vertical (que tiene en cuenta la reducción de la eficacia del confinamiento en el caso de vendajes discontinuos en el que se crean zonas no susceptibles de confinamiento) y el coeficiente que tiene en cuenta la reducción de la eficacia del confinamiento en caso de disposiciones helicoidales con inclinación α

$$k_{eff} = k_{eff} \cdot k_{eff} \cdot k_{\alpha}$$

La presión de confinamiento

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \epsilon_{ard}$$

es calculada a partir del porcentaje geométrico del refuerzo ρ_f , del módulo de refuerzo y de la deformación resultante de cálculo de refuerzo que vale:

$$\epsilon_{ard} = \min \{ \eta_a \cdot \epsilon_l \rho_f; 0.004 \}$$

El colapso del elemento confinado de hecho, en teoría es suficiente para la rotura de las fibras. Sin embargo a partir de un cierto valor de la deformación axial, el elemento confinado es parecido a un recipiente con las paredes muy flexibles lleno de material inconsistente. A partir de esto, pierde la propia funcionalidad. Tomando esto en consideración, el colapso de las fibras es normalmente alcanzado cuando se ha llegado a una deformación de máxima igualdad.

EL COSTE DEL MATERIAL

El acero es un material económico si se compara con los sistemas de fibra de carbono. En cambio los sistemas de fibra de carbono son un material más costoso debido a que requieren gran cantidad de aportación de energía en su fabricación (ej. aluminio). Esto, unido a que es un material poco utilizado en la construcción, hace que el costo del material sea mayor. Se puede estimar que para la misma capacidad resistente, las fibras de carbono son entre una y seis veces más costosas que el acero.

EL COSTE DE LA INSTALACION

El sistema Kimitech de fibras de carbono es un sistema extraordinariamente ligero y fácil de manipular. Esto hace que su aplicación e instalación sea muy rápida y prácticamente sin ninguna necesidad de medios auxiliares. En un día se pueden colocar varios cientos de metros lineales de refuerzo, lo que hace que el rendimiento sea mayor y el costo por unidad de medida de la aplicación sea muy bajo.

Kimia Ibérica

Polígono III Moncada
C/Quinsá, nº 37
46113 Moncada (Valencia)

Tel. (+34) 96 139 99 17
Fax (+34) 96 139 98 33

www.kimiaiberica.es
info@kimiaiberica.es

En cambio los elementos de acero son pesados y rígidos. Necesitan de la utilización de equipos especiales para su transporte y colocación y es necesario ejercer presión durante un determinado tiempo hasta que endurezca la resina de adhesión. Por eso el costo de la ejecución de estos sistemas tradicionales es más alto. Se puede estimar que el costo de aplicación de los sistemas con chapas pegadas es de tres a cuatro veces superior al del sistema Kimitech de fibra de carbono.

EL COSTE DEL MANTENIMIENTO

Las chapas de acero presentan el problema de la corrosión. Es necesario protegerlas y probablemente pintarlas varias veces a lo largo de su vida. Por el contrario, las fibras de carbono no presentan ese problema, por lo que el coste de mantenimiento es muy inferior.

DURABILIDAD

Debido a lo indicado anteriormente, la durabilidad esperable en los refuerzos realizados con el sistema Kimitech de fibras de carbono es bastante superior a los realizados en acero. El sistema Kimitech de fibras de carbono, al no sufrir corrosión, no es afectado ni por ambiente marino, húmedo o con agresión química. Salvo los impactos mecánicos o una radiación solar excesiva, hay pocas cosas que puedan deteriorar significativamente al sistema Kimitech de fibra de carbono.

COSTES ASOCIADOS

Cuando se realiza un refuerzo hay que pensar que suele ser de una instalación que ya está en funcionamiento: un puente sobre el que está pasando tráfico, una fábrica en funcionamiento, un edificio habitado... Por eso hay que tener en cuenta que el efectuar el refuerzo conlleva unos costes asociados, a parte de los propios de la ejecución: cortar el tráfico, para la fábrica, desalojar o molestar a los habitantes del edificio... Estos costes, muchas veces (en la mayor parte) son incluso mayores que los de la propia ejecución de refuerzo.

Kimia Ibérica

Polígono III Moncada
C/Quinsá, nº 37
46113 Moncada (Valencia)

Tel. (+34) 96 139 99 17
Fax (+34) 96 139 98 33

www.kimiaiberica.es
info@kimiaiberica.es

El comparativo de costes y rendimientos en términos porcentuales es el que se describe a continuación:

Estimación del valor característico de la resistencia

Los valores característicos de la resistencia de materiales **RK** son por definición aquellos que presentan una probabilidad prefijada **pR** para ser minimizados. Para determinarlos se admite que la estadística de los valores sacados para **n** *tendiendo a infinito* pruebas de laboratorio, se pueda describir por una estadística Gaussiana o normal en los dos parámetros de la población:

uR valor medio y **oR** desviación Standard. Como consecuencia la resistencia característica se define como la relación **RK=uR-K(pR).oR**

y por **pR=5%** se tiene que **K(0,05)=1645**, por lo tanto **RK(5%)=uR-1645 oR**

Prácticamente las pruebas de laboratorio son llevadas a cabo en un número **n** de muestras, que aún siendo muy grande es limitado. Por tanto los parámetros de la población (**uR**, **oR**) pueden solamente estimarse. La mejor estimación de tales parámetros se obtiene por las relaciones:

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \text{ media aritmética de los } n \text{ datos}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}{n-1}}, \text{ desprecio cuadrático medio de los } n \text{ datos}$$

Algunos test permiten juzgar la fiabilidad de los parámetros evaluados para que así sean significativos a los fines de las aplicaciones. La distribución **t de Student** es utilizada como test de significatividad para la estimación de la media mientras la distribución **x cuadrado** permite estimar la desviación Standard. El intervalo en el cual dentro de una probabilidad prefijada está contenido el valor verdadero de un parámetro, se llama **intervalo de fiabilidad (O)** y los extremos son los **límites de fiabilidad**.

Hormigón: $O = 75\%$ para las mayores incertidumbres intrínsecas en la producción y ejecución de las estructuras

Acero: $O = 95\%$ y habla de la mejor constancia en la producción y en las técnicas de realización de las estructuras

Teniendo entonces en cuenta el número n de muestras tomadas para examinar, la estimación de la resistencia característica se obtiene a partir de una de las dos relaciones equivalentes:

$$RK = Rm - K(n, p, 9) \cdot s ; RK = Rm (1 - K(n, p, 9) \cdot VR)$$

Donde $K(n, p, 9)$ es un coeficiente que depende del número de muestras n , del parámetro p y del intervalo de confianza, mientras $VR = s/R$ es el coeficiente de variación.

Los valores de $k(n, p, 9)$ para $p = 0,05$ se reportan en la tabla a continuación:

Tabla de valores de $K(n, p = 5\%, 9)$ para el hormigón y el acero

n	Hg: $O = 0,075$	Acero $O = 0,095$
6	2,33	3,71
8	2,19	3,19
10	2,10	2,91

