

8 CAPÍTULO**ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO****ÍNDICE**

8	CAPÍTULO: ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO.....	160
8.1	INTRODUCCIÓN.....	160
8.2	ESTADO LÍMITE DE DEFORMACIÓN.....	161
8.2.1	<i>Introducción.....</i>	<i>161</i>
8.2.2	<i>Cálculo de la flecha según código ACI.....</i>	<i>161</i>
8.2.2.1	Flecha instantánea.....	162
8.2.2.1.1	Cómputo de la flecha.....	164
8.2.2.2	Flecha diferida.....	164
8.2.2.3	Limitación de la flecha.....	165
8.2.3	<i>Cálculo de la flecha según normativa EHE.....</i>	<i>166</i>
8.2.3.1	Flecha instantánea.....	166
8.2.3.1.1	Cómputo de la flecha.....	168
8.2.3.2	Flecha diferida.....	168
8.2.3.3	Limitación de la flecha.....	169
8.2.4	<i>ESTUDIO DE LA FLECHA DIFERIDA CON EL PROCEDIMIENTO ALTERNATIVO SIMPLIFICADO PROPUESTO EN LOS COMENTARIOS DE LA NUEVA EHE.....</i>	<i>170</i>
8.2.4.1	Introducción.....	170
8.2.4.2	Aplicación del método alternativo simplificado de la EHE.....	170
8.2.4.3	Estudio comparativo.....	173
8.2.4.4	Conclusiones del estudio comparativo.....	177
8.3	ESTADO LÍMITE DE FISURACIÓN.....	178
8.3.1	<i>Introducción.....</i>	<i>178</i>
8.3.2	<i>Abertura de fisura según el código ACI.....</i>	<i>179</i>
8.3.2.1	Limitación de abertura máxima.....	180
8.3.3	<i>Abertura de fisura según la EHE.....</i>	<i>180</i>
8.4	COMPROBACIÓN DEL CREEP.....	182

8 CAPÍTULO: ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

8.1 INTRODUCCIÓN

Los estados límite de servicio son aplicados a las estructuras para asegurar la correcta funcionalidad e integridad bajo condiciones de servicio. En piezas armadas con acero, a veces, puede convertirse esta comprobación, más que en una verificación o chequeo rutinario, tras ser dimensionado, a priori, a través de los Estado Límites Últimos, en uno que gobierna el diseño del elemento. Por el contrario, en piezas armadas con FRP es usual que ocurra este hecho, gracias, principalmente, al relativamente bajo módulo elástico que poseen. Sin ir más lejos, cabe recordar que uno de los motivos por los que se recomendaba diseñar en dominio 4, es para evitar excesivas deformaciones y fisuras que, de otra forma, en el dominio 2 cabría esperarse. Típicamente, de la sustitución del armado con acero, por la misma área de FRP, producen más amplias fisuras y deformaciones. Es por tanto razonable concluir, que en el caso de los FRP, es crítico controlar los Estados Límites de Servicio.

A igual que pasaba en los ELU, no hay razones por las que las bases de cálculos para la verificación de los ELS en piezas armadas con acero, no sean aplicable al armado con FRP. Aunque si es verdad que es necesario retocar las formulaciones para adaptar las diferentes propiedades mecánicas de los mismos. Además, hay que considerar que una de las virtudes de los FRP es su resistencia a la corrosividad, de forma que la posible exposición directa al exterior, no produce problemas en cuanto a su durabilidad. Por ello, además de la formulación, debería de modificarse ciertas limitaciones impuestas por las normativas, como la abertura máxima de fisura.

En general las siguientes comprobaciones han de verificarse en los ELS:

- Deformaciones (a corta o largo tiempo)
- Fisuraciones
- Creep

Recordar que el creep es un fenómeno de larga duración, en el que sometido el FRP a tensiones por debajo de su límite elástico, puede romperse tras un periodo de tiempo determinado. Estudios han concluido que el creep no dependen exclusivamente del nivel de tensión sostenida, sino, las condiciones ambientales circundantes también influyen en el tiempo de fallo (humedad, temperatura, alcalinidad...). Por ello hay que verificar que, durante la vida de servicio establecida y bajo las condiciones ambientales y tensiones solicitadas, no se produce el fallo a largo tiempo. A efecto de esta verificación el código ACI establece unas tensiones límites que no deben ser rebasadas, y que dependen *únicamente* del tipo de refuerzo (ver tabla). No obstante, si se recurre al diseño recomendado en este documento, y propuesto por el Task group 9.3, esta comprobación ya no ha de hacerse, pues en las propiedades de diseño del FRP ya se tiene en cuenta el creep junto con el efecto de las condiciones ambientales (tal y como se da en la realidad).

8.2 ESTADO LÍMITE DE DEFORMACIÓN

8.2.1 Introducción

Bajo similares condiciones, en términos de hormigón, cargas, geometría del elemento y área de refuerzo, el armado con FRP desarrolla normalmente mayores deformaciones que el acero. Principalmente se debe al bajo módulo elástico y por tanto altas deformaciones que experimentan, aunque también puede ser influenciado por las posibles diferencias en las propiedades adherentes (sin embargo, a priori, y a menos que el fabricante lo concrete explícitamente, se consideran similares al acero). Estas flechas pueden tener una notable influencia sobre el resto de la construcción, de manera que, puede dañar elementos frágiles como tabiquería o zonas acristaladas. También puede influir en el confort de los usuarios o simplemente en la estética de la construcción. Por ello la mayoría de las normas la suele limitar, en los sucesivos apartados se comentaran dicho límites tanto para la EHE como para el código norteamericano.

El método de cálculo de la deformación puede ser sumamente complicado dependiendo de la precisión que se necesite. En este documento se tratará el método simplificado aplicado a vigas de sección rectangular sometidas a flexión simple que es lo que se ha venido describiendo. De esta manera la flecha se considera compuesta por la suma de una flecha instantánea más una flecha diferida (En el párrafo siguiente se explican los tipos de flecha). Y además se tiene en cuenta la fisuración del elemento, así que se suele considerar dos estados, uno fisurado totalmente y otro sin fisurar, siendo el real un caso intermedio. Concretamente, y como se ha venido haciendo, en este documento se expondrá el método utilizado por el código ACI y posteriormente la adaptación de la EHE.

La división principal de los diferentes tipos de flecha se basa en el tiempo de aparición de ellas. Por lo tanto, se habla de flecha instantánea a aquella que aparece a corto periodo, mientras que se entiende por flecha diferida a aquella que aparece a lo largo del tiempo debido a la retracción y fluencia del hormigón, propagación de grietas y formación de nuevas. Normalmente lo que suele limitar las normativas son las flechas totales a largo plazo: que engloban la instantánea y diferida de todas las cargas actuantes, y la flecha activa respecto un elemento dañable: que se define como la flecha que aparece a partir de la construcción del elemento, esto es la total menos la producida hasta el instante en el que se construye.

8.2.2 Cálculo de la flecha según código ACI

El código ACI habla que en esencia se puede aplicar la misma formulación del armado convencional para el armado con FRP. Así, distingue dos tipos de flechas, uno a corto periodo (short-term) que puede ser calculado por las fórmulas típicas de resistencia de materiales en función de un momento de inercia equivalente de la sección, y otro a largo periodo (long-term) debido a la fluencia y retracción del hormigón. A continuación se describe cada una separadamente

8.2.2.1 Flecha instantánea

El cálculo de la flecha instantánea puede ser derivado de la fórmula de resistencia de materiales. Por lo tanto, además de las cargas, depende de la inercia de la sección y del módulo elástico. Cuando la sección esta no fisurada, su inercia es igual a la de la sección bruta (I_g). Pero cuando el momento aplicado rebasa el momento de fisuración (M_{cr}), una reducción de la misma ha de ser esperado, siendo a lo suma la inercia fisurada completa de la sección (I_{cr}). Esto es, suponiendo que el elemento se encuentra fisurado, la inercia de la sección puede variar entre la I_g y I_{cr} dependiendo del momento aplicado. Branson [14] propuso la siguiente ecuación a modo de aproximar la inercia equivalente de la misma:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_s} \right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_s} \right)^3 \right] \cdot I_{cr} \quad (8.1)$$

Siendo:

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (8.2)$$

$$I_{cr} = \frac{b \cdot d^3 \cdot k^3}{3} + n_f \cdot A_f \cdot d^2 \cdot (1 - k)^2 \quad (8.3)$$

$$\left| \begin{array}{l} k = \sqrt{2 \cdot \rho_f \cdot n_f + (\rho_f \cdot n_f)^2} - \rho_f \cdot n_f \\ n_f = \frac{E_f}{E_c} \end{array} \right. \quad (8.4)$$

$$M_{cr} = f_r \cdot W_g \quad (8.6)$$

$$\left| \begin{array}{l} W_g = \frac{b \cdot h^2}{6} \end{array} \right. \quad (8.7)$$

Esta ecuación es la utilizada, por el código ACI, para el hormigón armado convencional. Estudios (Benmokrane, chaaallal, and Masmoudi (1996) [12]) llevados a cabo sobre vigas armados con FRP simplemente apoyadas demuestran que, si se dibuja la flecha máxima frente a la carga, las curvas experimentales son paralelas a estas predichas con la ecuación anterior. Concluyen que la fórmula de Branson puede sobreestimar la inercia de la sección, provocando menores deformaciones de las reales. Gao, Benmokrane, and Masmoudi [17] propusieron que, para tener en cuenta el bajo módulo elástico de los FRP y diferente adherencia de las barras, una modificación de la ecuación era necesaria. Por lo tanto recomendaron la siguiente ecuación:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_s} \right)^3 \cdot I_g \cdot \beta_d + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_s} \right)^3 \right] \cdot I_{cr} \quad (8.8)$$

Donde:

$$\beta_d = \alpha_b \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} + 1 \right) \quad (8.9)$$

Siendo α_b un coeficiente que informa sobre la adherencia del tipo de fibra. De acuerdo con los resultados de los test, sobre vigas simplemente apoyadas armadas con GFRP, se encontró que el valor es de 0.5, igual que para las barras de acero. Recomendándose, a falta de experimentos más precisos, para el resto de los FRP y puntualizando que, para el caso de los CFRP, esta predicción podría ser conservativa. Esta última formulación fue acogida por el código ACI 440.1R-03 no sin falta de polémica pues, estudios paralelos llevados por Zhao, Pilakoutas and Waldron (1997) [22] demostraba que, a través de sus experimentos, la ecuación original del código ACI, sin modificación alguna, podría adecuadamente predecir la flecha en elementos armados con FRP.

Más tarde, el código ACI 440.1R-06 abandonó el coeficiente β_d basado en la adherencia, y tomó β_d proporcional a la relación entre cuantía dispuesta y balanceada. Dicha modificación ahora se basa en criterios estadísticos basados sobre datos experimentales, siguiendo hoy día bajo debate por algunos investigadores.

$$\beta_d = \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \quad (8.10)$$

Por último mencionar que, recientemente se ha propuesto una expresión alternativa de la inercia equivalente. Bischoff and Scanlon(2007) [17] proponen una fórmula diferente a la utilizada convencionalmente (fórmula de Branson), acercándose más bien a la que utiliza el CEB y el Eurocódigo 2. Esta es:

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \eta_e \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_s} \right)^2} \quad (8.11)$$

Donde:

$$\eta_e = 1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \quad (8.12)$$

Notación:

I_g = Inercia bruta de la sección

I_{cr} = Inercia fisurada de la sección

I_e = Inercia equivalente de la sección (solo valida para momentos superiores al de fisuración)

M_{cr} = Momento de fisuración

M_s = Momento aplicado

k = Relación entre la profundidad de la fibra neutra y el canto útil de la sección

η_f = Relación entre el módulo de deformación del refuerzo y del hormigón

W_g = Módulo resistente de la sección bruta

β_d = Coeficiente corrector de la fórmula de Branson

α_b = Coeficiente que informa sobre la adherencia de las barras
 ρ_{fb} = Cuantía balanceada de la sección

8.2.2.1.1 Cómputo de la flecha

La flecha máxima de un elemento, como se ha comentado anteriormente, puede obtenerse de la fórmula de resistencia de materiales. Por lo tanto depende de la luz salvada, del tipo de apoyo (simplemente apoyada o continua), del tipo de carga (concentrada o repartida), y de la rigidez "EI". El módulo elástico es el definido en el capítulo 5 y la inercia puede ser tomada constante en toda la pieza e igual a una de referencia tal como se detalla a continuación:

- En elementos simplemente apoyados, la inercia equivalente en la sección central.
- En vanos intermedios de elementos continuos:

$$I_e = 0.7I_m + 0.15 \cdot (I_{e1} + I_{e2}) \quad (8.13)$$

- En vanos extremos con continuidad en uno de los apoyos:

$$I_e = 0.85 \cdot I_m + 0.15 \cdot I_{ee} \quad (8.14)$$

Donde:

I_m = Inercia equivalente en el medio de la vano

I_{e1}, I_{e2} = Inercia equivalente en los apoyos continuos del elemento.

I_{ee} = Inercia equivalente en el apoyo continuo.

8.2.2.2 Flecha diferida

El código ACI 318 calcula las deformaciones diferidas, en elementos armados con acero, utilizando un método simple basado en coeficientes multiplicativos de las flechas instantáneas debidos a cargas sostenidas:

$$\Delta_D = \lambda \cdot \Delta_i \quad (8.15)$$

Donde:

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad (8.16)$$

Siendo:

λ = Factor multiplicativo de la flecha instantánea.

ξ = coeficiente función de la duración de la carga.

5 o más años	2
1 año	1.4
6 meses	1.2
3 meses	1
1 mes	0.7
2 semanas	0.5

ρ' = Cuantía longitudinal a compresión.

Δ_D = Flecha diferida de la carga evaluada.

Δ_i = Flecha instantánea de la carga evaluada.

Consiguientemente, el código ACI 440.1R propone que esta ecuación puede ser usada para armados con FRP, aplicando algunas modificaciones para tener en cuenta las diferencias del nivel de compresión en el hormigón, bajo módulo elástico y posible diferente adherencia. Además considerar que los FRP a compresión no son efectivos luego ρ' es igual a cero. En base a experimentos realizados sobre FRP se concluye que, la flecha diferida en estos elementos suele ser menor, proponiendo una modificación del factor ξ (relación ξ_{FRP}/ξ_{Acero}) de 0.6. Por tanto la formulación queda como sigue:

$$\Delta_D = 0.6\xi \cdot \Delta_i \quad (8.17)$$

8.2.2.3 Limitación de la flecha

A continuación se expone una tabla donde se explica el tipo de elemento al que es aplicable la limitación, cómo se aplica, y valor límite respecto a luz del elemento.

Table 8.2 Minimum Permissible Ratios of Span (*l*) to Deflection (Δ) (*l* = longer span)

Type of Member	Deflection, Δ , to be Considered	$(l/\Delta)_{min}$
Flat roofs not supporting and not attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	Immediate deflection due to live load <i>L</i>	180 ^a
Floors not supporting and not attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	Immediate deflection due to live load <i>L</i>	360
Roof or floor construction supporting or attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	That part of total deflection occurring after attachment of nonstructural elements: sum of long-term deflection due to all sustained loads (dead load plus any sustained portion of live load) and immediate deflection due to any additional live load ^b	480 ^c
Roof or floor construction supporting or attached to nonstructural elements not likely to be damaged by large deflections		240 ^c

^aLimit not intended to safeguard against ponding. Ponding should be checked by suitable calculations of deflection, including added deflections due to ponded water, and considering long-term effects of all sustained loads, camber, construction tolerances, and reliability of provisions for drainage.

^bLong-term deflection has to be determined, but may be reduced by the amount of deflection calculated to occur before attachment of nonstructural elements. This reduction is made on the basis of accepted engineering data relating to time-deflection characteristics of members similar to those being considered.

^cRatio limit may be lower if adequate measures are taken to prevent damage to supported or attached elements, but should not be lower than tolerance of nonstructural elements.

Tabla obtenida de ACI 318-05 [2]

8.2.3 Cálculo de la flecha según normativa EHE

La formulación desarrollada por la EHE es prácticamente igual que la tratada por el código ACI. La flecha instantánea es calculada con las fórmulas de resistencia de materiales, utilizando una inercia equivalente que se obtiene igualmente de la interpolación de Branson. Y recurre al método del coeficiente multiplicativo de la flecha instantánea, debido a cargas sostenidas, para calcular la flecha diferida. Por tanto, para adaptar la formulación para el armado con FRP, las mismas modificaciones del código ACI caben ser aplicadas a la EHE.

8.2.3.1 Flecha instantánea

Para el cálculo de la flecha instantánea, y a falta de métodos más rigurosos, se puede aplicar la formulación de resistencia de materiales, tomando como modulo elástico el definido en el capítulo 5 e inercia equivalente de la sección cualquiera de los detallados en el apartado correspondiente del código ACI:

Inercia equivalente obtenida de la modificación de la formulación de Branson:

$$I_e = \left(\frac{M_f}{M_a} \right)^3 \cdot I_b \cdot \beta_d + \left[1 - \left(\frac{M_f}{M_a} \right)^3 \right] \cdot I_f \tag{8.18}$$

Donde:

$$I_b = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (8.19)$$

$$I_f = n_f \cdot A_f \cdot (d - x) \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right) \quad (8.20)$$

$$\left| \begin{array}{l} x = d \cdot \left[\sqrt{(\rho_f \cdot n_f)^2 + 2 \cdot \rho_f \cdot n_f} - \rho_f \cdot n_f \right] \end{array} \right. \quad (8.21)$$

$$\left| \begin{array}{l} n_f = \frac{E_f}{E_c} \end{array} \right. \quad (8.22)$$

$$M_f = f_{ct.m.fl} \cdot W_b \quad (8.23)$$

$$\left| \begin{array}{l} W_b = \frac{b \cdot h^2}{6} \end{array} \right. \quad (8.24)$$

Según modificación ACI 440.1R-03

$$\beta_d = \alpha_b \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} + 1 \right) \quad (8.25)$$

Según modificación ACI 440.1R-06

$$\beta_d = \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \quad (8.26)$$

Inercia equivalente propuesto por Bischoff and Scanlon similar al Eurocódigo 2. Se cree que esta adaptación es más correcta porque el coeficiente que propone el código ACI-06 se debe a una adaptación estadística en base a su formulación. De hecho la cuantía balanceada calculada según una y otra normativa puede variar. En el caso que se recurra a la fórmula del código ACI se recomienda no reducir las propiedades de los materiales por coeficientes de seguridad.

$$I_e = \frac{I_f}{1 - \eta_e \cdot \left(\frac{M_f}{M_a} \right)^2} \quad (8.27)$$

Donde:

$$\eta_e = 1 - \frac{I_f}{I_b} \quad (8.28)$$

Notación:

I_b = Inercia bruta de la sección

I_f = Inercia fisurada de la sección

I_e = Inercia equivalente de la sección (solo valida para momentos superiores al de fisuración)

M_f = Momento de fisuración

M_a = Momento aplicado

n_f = Relación entre el módulo de deformación del refuerzo y del hormigón

W_b = Módulo resistente de la sección bruta

β_d = Coeficiente corrector de la fórmula de Branson

α_b = Coeficiente que informa sobre la adherencia de las barras

ρ_{fb} = Cuantía balanceada de la sección

8.2.3.1.1 Cómputo de la flecha

A igual que el código ACI, la inercia de la pieza puede ser tomada constante en toda la pieza e igual a una de referencia tal como se detalla a continuación:

- En elementos simplemente apoyados, la inercia equivalente en la sección central.
- En elementos en voladizo, la inercia equivalente en la sección de arranque.
- En vanos intermedios de elementos continuos:

$$I_e = 0.5I_{ec} + 0.25 \cdot (I_{ee1} + I_{ee2}) \quad (8.29)$$

- En vanos extremos con continuidad en uno de los apoyos:

$$I_e = 0.75 \cdot I_{ec} + 0.25 \cdot I_{ee} \quad (8.30)$$

Donde:

I_{ec} = Inercia equivalente en el centro de la vano

I_{ee1}, I_{ee2} = Inercia equivalente en los apoyos continuos del elemento.

I_{ee} = Inercia equivalente en el apoyo continuo.

8.2.3.2 Flecha diferida

Las flechas diferidas pueden ser estimadas, a igual que el código ACI, multiplicando la flecha instantánea correspondiente por un factor ξ , teniendo en cuenta que no existe refuerzo superior. Esto es:

$$y_D = 0.6\xi \cdot y_i \quad (8.31)$$

Siendo:

ξ = coeficiente función de la duración de la carga.

5 o más años	2
1 año	1.4
6 meses	1.2
3 meses	1
1 mes	0.7
2 semanas	0.5

Para edad j de carga y t de cálculo de la flecha, el valor de ξ a tomar en cuenta es $\xi^{(t)} - \xi^{(j)}$.

y_D = Flecha diferida de la carga evaluada.

y_i = Flecha instantánea de la carga evaluada.

8.2.3.3 Limitación de la flecha

A continuación se expone una tabla con las limitaciones de flechas según la normativa española.

Tabla 8.4: Limitación de flecha

Tipo de miembro	Flecha a considerar	Flecha límite relativa
En general, en edificaciones normales.	Flecha total a plazo infinito. Esta flecha sería la suma de la flecha activa más la flecha instantánea de la estructura más la diferida de esta hasta el momento de la construcción de elementos no estructurales	L/250
En general, para tener en cuenta el confort de los usuarios.	Flecha instantánea debido a sobrecarga	L/350
En general, para evitar la fisuración de elementos no estructurales como tabiquería, acristalamiento, etc.	Flecha activa. Flecha a largo plazo partir de la construcción de elementos no estructurales y considerando parte de carga de uso como cuasi permanente.	L/500

8.2.4 ESTUDIO DE LA FLECHA DIFERIDA CON EL PROCEDIMIENTO ALTERNATIVO SIMPLIFICADO PROPUESTO EN LOS COMENTARIOS DE LA NUEVA EHE.

8.2.4.1 Introducción

En lo que se refiere a la flecha diferida, existen varios procedimientos analíticos con mayor o menor grado de simplificación. Entre los más usados son: El propuesto por el Eurocódigo, basado en la interpolación de deformaciones entre el estado no fisurado y fisurado; y los métodos basados en coeficientes multiplicativos de las deformaciones instantáneas utilizados comúnmente por el código ACI y EHE.

Uno de los aspectos más cuestionados de este último método, cuando se ha aplicado a estructuras de hormigón armado con acero, ha sido que los coeficientes tomados provienen del ajuste de una serie de elementos de hormigón a flexión, bajo unas ciertas condiciones, que no tienen que ser iguales para todos los casos. Esto es, si las propiedades mecánicas de los materiales o las condiciones ambientales son sensiblemente diferentes, probablemente el cálculo de dicha flecha diferida, mediante este método, no se acerque al real. De ahí, que la propia EHE presente un procedimiento alternativo que contemple estas diferencias, explicando que este procedimiento es especialmente útil para el caso de hormigones diferentes a los convencionales como los de alta resistencia. Y por ende, siendo el uso de esta metodología aún más recomendable, si junto con las posibles diferencias de propiedades mecánicas del hormigón se le añaden las del refuerzo interno.

A continuación, se va a estudiar la aplicación del método alternativo simplificado propuesto por la EHE, para el cálculo de la flecha diferida en elementos reforzados con FRP sin armadura a compresión, que es habitual en este tipo de elementos. Y posteriormente, se va a comparar con los resultados obtenidos de aplicar el método del coeficiente multiplicativo propuesto por el código ACI. Cabe mencionar que es totalmente similar al propuesto inicialmente por la EHE, donde el coeficiente multiplicativo se ha reducido a 0.6. Esta reducción viene explicada por el hecho de que: resultados sobre varios estudios experimentales han concluido que los incrementos de flecha a largo plazo, sobre elementos a flexión armadas con FRP y sin armaduras a compresión, son menores que los esperados para hormigón armado convencional. [26]

8.2.4.2 Aplicación del método alternativo simplificado de la EHE

Recordando nuevamente, las flechas diferidas son provocadas por el efecto de las cargas de larga duración debido a las deformaciones por fluencia y retracción. Así pues, en este método, para un análisis más detallado donde interviene más variables, separada razonadamente el efecto de las deformaciones por retracción de las de fluencia, y plantea congruentemente que la deformada diferida total es la suma de ambas. Si nos centramos en la flecha diferida por retracción, ésta depende de la geometría de la sección, de la retracción del hormigón y de la longitud de la viga así como el tipo de apoyo que presenta. Es decir, es invariable respecto a las características de los refuerzos así como su cuantía y la flecha instantánea, y siendo por tanto definido íntegramente por las condiciones ambientales, geométricas y propiedades del hormigón evaluadas en un instante determinado. Mientras que la

flecha diferida debido a la fluencia es un coeficiente multiplicativo de la flecha instantánea debido a cargas consideradas, que depende además de las propiedades del refuerzo interno. Veamos seguidamente su formulación. Recordar antes, que en esta formulación no se ha tenido en cuenta la existencia de una armadura superior a compresión:

- Deformación por retracción:

$$y_{\text{ret}} = k_b \cdot \frac{\varepsilon_r}{d} \cdot \frac{L^2}{8} \quad (8.32)$$

Donde:

y_{ret} = Flecha de retracción.

ε_r = Deformación de retracción.

k_b = constante que dependen de las condiciones de apoyo siendo: 1 para biapoyadas; 0.7 para vanos extremos de vigas continuas; 0.5 para vanos internos de vigas continuas o vigas biempotradas.

L = Longitud de la viga.

- Deformación por fluencia:

$$y_{\varphi} = y \cdot \varphi \cdot \frac{x(\text{np})}{d} \quad (8.33)$$

Considerando una sección fisurada sin armadura a compresión, se tiene que la profundidad de la línea neutra es:

$$x(\text{np}) = d \cdot \text{np} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\text{np}}} \right) \quad (8.34)$$

Donde:

φ = Coeficiente de fluencia.

x/d = Profundidad de la fibra neutra relativa al canto útil.

np = Coeficiente que tiene en cuenta la relación entre módulos de los materiales y la cuantía de armadura a tracción.

y = Flecha instantánea.

d = longitud del canto útil.

Por lo tanto, una vez definidas el tipo de hormigón a escoger, la clase de exposición ambiental, geometría del elemento y el tiempo para el que se evalúa la flecha diferida, el principal responsable de la discrepancia que presentan los elementos armados con FRP respecto a los convencionales, es el termino de fluencia. Esto es, fuera a parte de que las flechas instantáneas son mayores en elementos reforzados internamente con barras de material compuesto debido a que el módulo elástico es menor, el coeficiente multiplicativo de esta flecha también varía sensiblemente debido a la diferencian de cuantías dispuestas y módulos relativos. Tanto es así que vamos a estudiar la virada de este término relativo a la variación del coeficiente multiplicativo.

En este estudio, para contemplar los diferentes tipos de FRP, se va a considerar que

el módulo elástico varía entre 40-200GPa. Además, es observado que la cuantía geométrica que balancea el modo de rotura entre compresión del hormigón y tracción de la fibra oscila entre el 0.3% y el 1% dependiendo de las propiedades del FRP y del hormigón, por ello vamos a considerar una variación de la misma entre 0.1%-1.2% (para tener en cuenta la posibilidad de sobre-reforzado o viceversa). En cuanto a lo que respecta a las propiedades del hormigón, y para considerar un amplio espectro de posibilidades, se va a tomar una resistencia a tracción comprendida entre 30-70MPa y un coeficiente de fluencia, para una duración superior a 5 años, entre 1.5-3.

Con todo ello se tiene que el coeficiente “ η_p ”, varía entre 0.001 y 0.065 tal y como se aprecia en las figuras siguientes:

En la figura 1, se puede ver como varía este parámetro en función del módulo elástico del refuerzo y de la resistencia característica a tracción que define el módulo elástico del hormigón para una cuantía geométrica constante de 0.4%. De ella se puede concluir que la influencia de la resistencia del hormigón es escasa, siendo la variable dominante, en esta gráfica, el módulo elástico del refuerzo. Por tanto, para estudiar ahora la influencia, en el coeficiente “ η_p ”, de la cuantía geométrica, es lógico tomar la resistencia del hormigón constante e igual a su valor pésimo. Esto último corresponde a la figura 2, donde finalmente se puede apreciar que el coeficiente “ η_p ” varía entre 0.001 y 0.03.

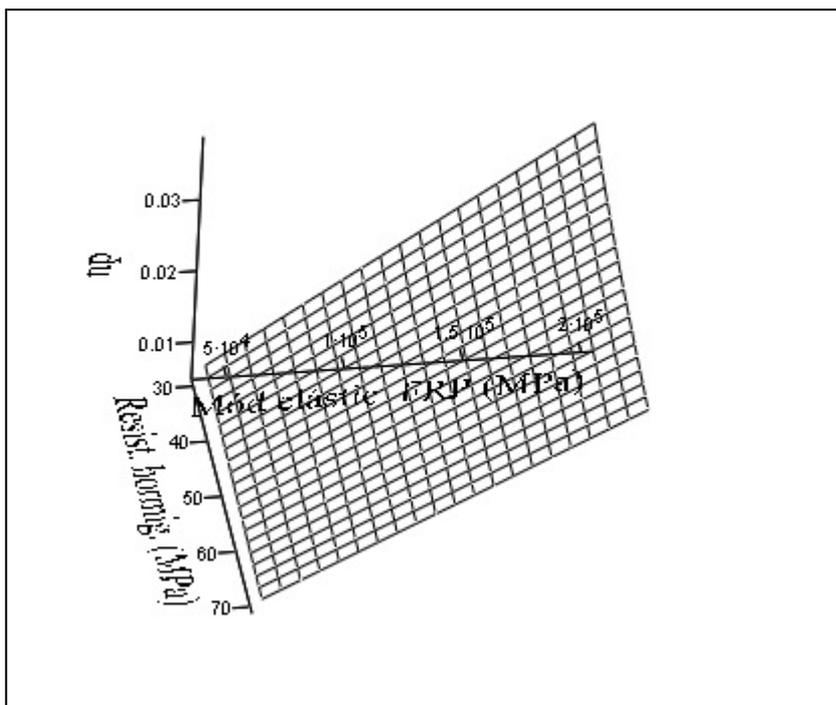


Fig. 8.1: Variación del parámetro “ η_p ” respecto al módulo elástico del refuerzo y la resistencia del hormigón para una cuantía geométrica de 0.4%.

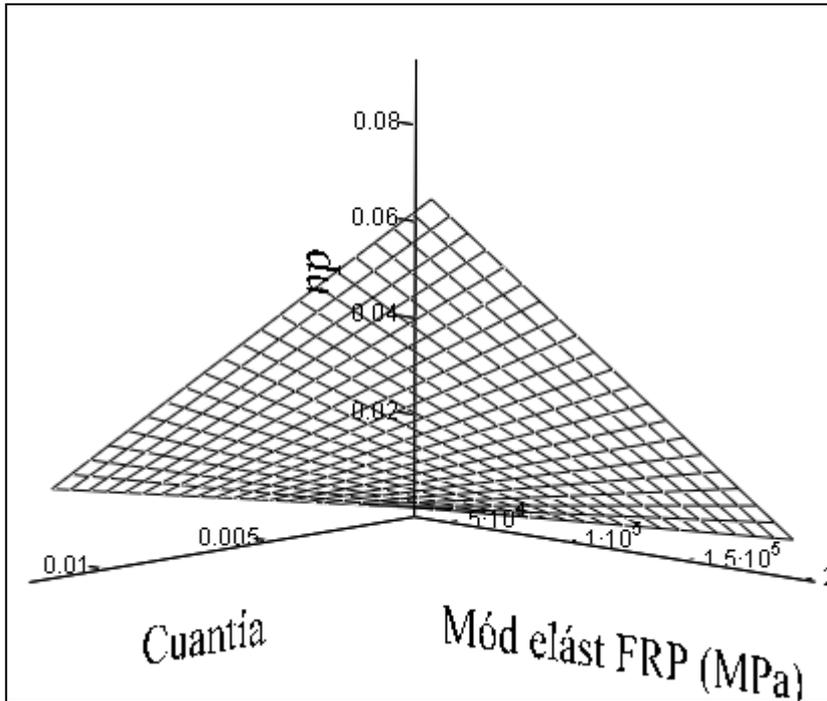


Fig. 8.2: Variación del parámetro “np” en función de la cuantía geométrica y del módulo elástico del refuerzo para una resistencia del hormigón de 30MPa.

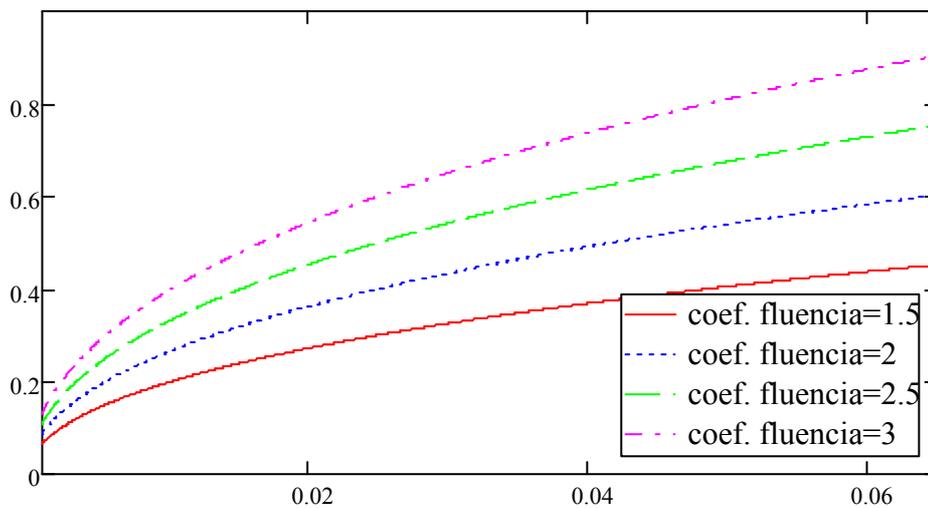


Fig. 8.3: Coeficiente multiplicativo para flecha diferida debido a fluencia.

De esta gráfica cabe decir que, el coeficiente multiplicativo crece a medida que el producto np aumenta, y por tanto la profundidad de la fibra neutra, y a medida que el coeficiente de fluencia también se incrementa, hasta llegar en torno a un coeficiente multiplicativo de 0.8.

8.2.4.3 Estudio comparativo

En este apartado se va a hacer un estudio comparativo de los resultados obtenido con el método propuesto por el código ACI y el comentado anteriormente. Para ello se va a

estudiar la flecha activa de una viga biapoyada siguiendo el procedimiento descrito por el código ACI y aplicando respectivamente el método del coeficiente multiplicativo y el método alternativo de la EHE, para obtener la flecha diferida a largo tiempo. Recordar que la flecha activa se define como la flecha que se produce a partir del momento de la construcción de elementos no estructurales y está formada principalmente por la flecha instantánea debido a la carga variable más la flecha diferida debido al peso propio y una parte de la carga variable suponiendo que es cuasi-permanente. De esta forma, la guía ACI procede de la siguiente manera para su cálculo:

$$\Delta_{LT} = \Delta_{i,LL} + \lambda \cdot (\Delta_{i,DL} + 0.2 \Delta_{i,LI}) \quad (8.35)$$

En el que las flechas instantáneas son definidas por sus cargas respectivas:

$$\Delta_{i,DL} = \frac{W_{DL}}{W_{DL,LL}} \cdot \Delta_{i,DL,LI} \quad (8.36)$$

$$\Delta_{LL} = \frac{W_{LL}}{W_{DL,LL}} \cdot \Delta_{i,DL,LI} \quad (8.37)$$

$$\lambda = 0.6 \cdot \zeta \quad (8.38)$$

Donde:

$\Delta_{i,LL}$ = Flecha instantánea debido a carga variable

$\Delta_{i,DL}$ = Flecha instantánea debido a carga permanente

$\Delta_{i,DL,LI}$ = Flecha instantánea global debido a sendas cargas.

Δ_{LT} = Flecha activa a largo tiempo

W_{DL} = Carga permanente

W_{LL} = Carga Variable

$W_{DL,LL}$ = Carga total

λ = Coeficiente multiplicativo

ζ = Coeficiente que engloba la fluencia y la retracción siendo igual a 2 para una duración superior a 5 años

Como se puede ver en la ecuación (8.30), para el cálculo de la flecha diferida se ha utilizado un coeficiente multiplicativo (λ) que afecta a la flecha instantánea debido a las cargas permanentes y cuasi-permanentes. Además es necesario decir que esta flecha activa viene limitada según la guía ACI en $L/240$.

Siguiendo con este procedimiento pero aplicando el método alternativo de la EHE, la formulación quedaría de la siguiente manera:

$$y_{LT} = y_{i,CV} + y_{\phi} + y_{ret} \quad (8.39)$$

Que especificando cada término queda:

$$y_{LT} = y_{i,CV} + \frac{x}{d} \cdot \phi \cdot (y_{i,CP} + 0.2 y_{i,CV}) + k_b \cdot \frac{\epsilon_r}{d} \cdot \frac{L^2}{8} \quad (8.40)$$

Donde:

$y_{i,CV}$ = Flecha instantánea debido a carga variable. Equivalente a $\Delta_{i,LL}$

$y_{i,CP}$ = Flecha instantánea debido a carga permanente. Equivalente a $\Delta_{i,DL}$

y_{LT} = Flecha activa a largo tiempo. Equivalente a Δ_{LT}

A efectos de este estudio comparativo se podría coger flechas instantáneas aleatorias de manera que cumplan con la limitación propuesta, pero para una mejor claridad de exposición y además desde el punto de vista de la seguridad, se cogerá el caso límite donde, cualquiera que sea la combinación de cargas, produce una flecha activa, aplicando el método del coeficiente multiplicativo, que llega al límite propuesto. Esto es:

$$\frac{L}{240} = \Delta_{i,LL} + \lambda \cdot (\Delta_{i,DL} + 0.2 \Delta_{i,LL}) \quad (8.41)$$

Si definimos r como el cociente entre carga permanente y total se tiene que:

$$\Delta_{i,LL,DL} = \frac{L}{240} \cdot \frac{1}{(1-r) + \lambda \cdot [r + 0.2(1-r)]} \quad (8.42)$$

Donde

$$r = \frac{W_{DL}}{W_{DL,LL}} \quad (8.43)$$

Por tanto, la flecha activa definida según el procedimiento de la guía ACI y el método del coeficiente multiplicativo viene dada por $L/240$. Mientras que la flecha activa utilizando el método alternativo propuesto por la EHE viene dada por:

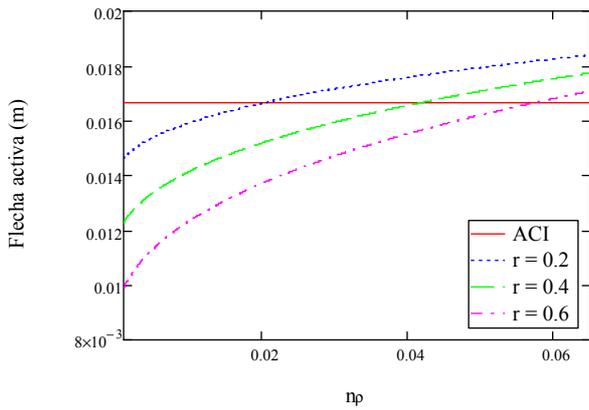
$$y_{LT} = y_{i,CP,CV}(1-r) + \frac{x}{d} \cdot \varphi \cdot [y_{i,CP,CV}[r + 0.2(1-r)]] + k_b \cdot \frac{\epsilon_r}{d} \cdot \frac{L^2}{8} \quad (8.44)$$

Donde:

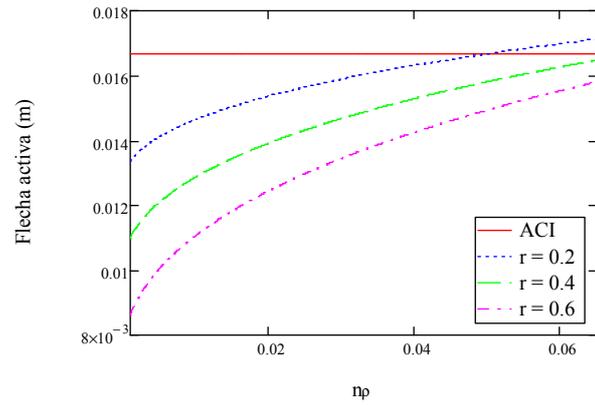
$$y_{i,CP,CV} \equiv \Delta_{i,DL,LL} \quad (8.45)$$

Consiguientemente se muestran gráficamente los resultados comparativos para sendos métodos. En ellos se ha procurado coger unos datos genéricos de manera que se contemple la mayor parte de los casos. Por tanto, el producto nr se ha establecido como antes, estando comprendido entre 0.001 y 0.065. E igualmente con las propiedades del hormigón como la fluencia y la retracción cuyo rango de valores respectivos son de $1.5 \cdot 10^{-3}$ y $300 \cdot 10^{-6}$ - $500 \cdot 10^{-6}$. Mientras que para la geometría de la viga se ha escogido con unas longitudes de 4 m y 5 m, siendo su sección de 300 mm de anchura por 350 mm de altura y con un canto útil de 315 mm.

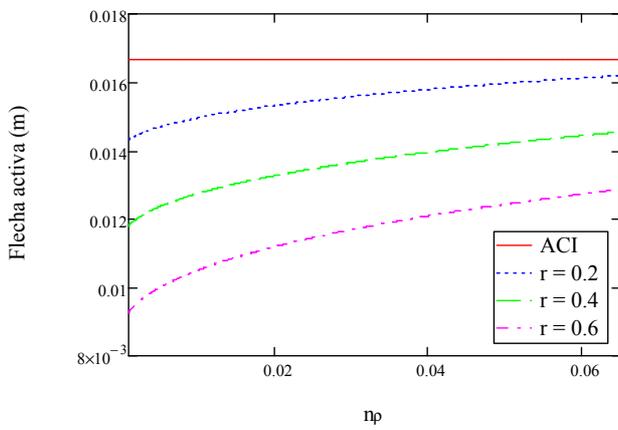
En las primeras cuatro gráficas se muestran los diferentes resultados, dependiendo de las variables establecidas, para una viga de longitud 4 m. Así pues, se ha estudiado la repercusión del incremento del coeficiente de fluencia y el aumento de la deformación por retracción en función del producto nr . Además para cada gráfica se contempla la relevancia de la combinación de cargas. Véanse sin más dichas gráficas:



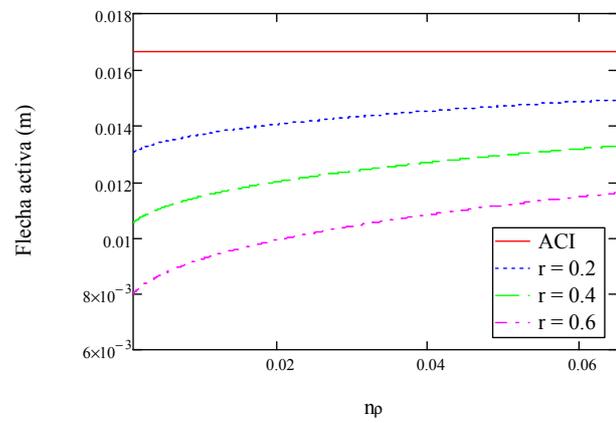
L=4m; coef. flenc= 3; def. retracc. = 0.0005



L=4m; coef. flenc= 3; def. retracc. = 0.0003

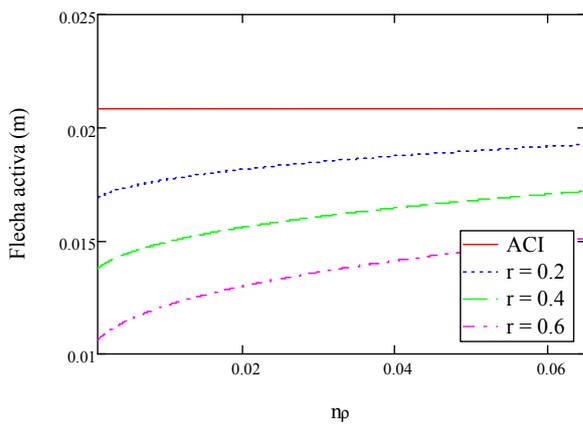


L=4m; coef. flenc= 1.5; def. retracc. = 0.0005

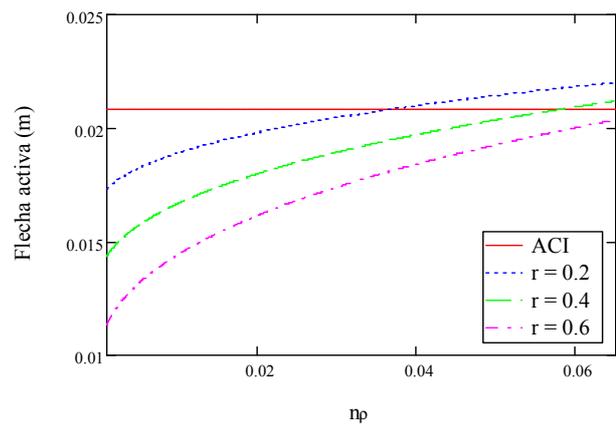


L=4m; coef. flenc= 1.5; def. retracc. = 0.0003

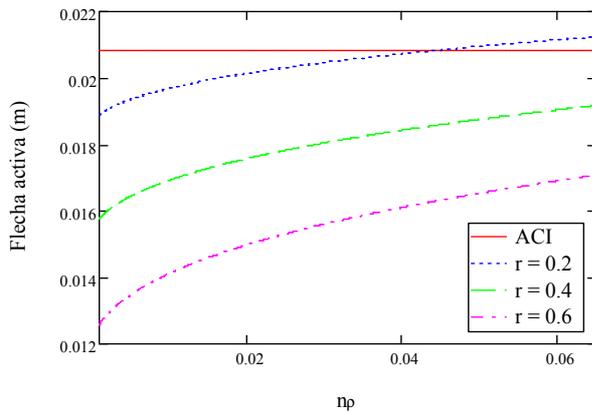
Procediendo, congruentemente, del mismo modo con las siguientes 4 gráficas para una longitud de 5 m:



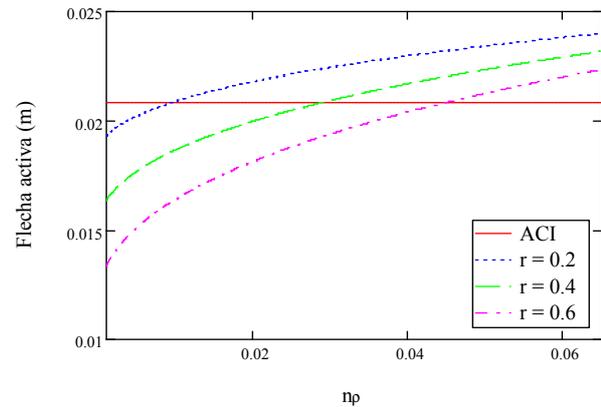
L=5m; coef. flenc= 1.5; def. retracc. = 0.0003



L=5m; coef. flenc= 3; def. retracc. = 0.0003



$L=5m$; coef. flenc= 1.5; def. retracc. = 0.0005



$L=5m$; coef. flenc= 3; def. retracc. = 0.0005

La idea fundamental es que dado unas cargas, la flecha activa viene dada por medio de una combinación de las flechas instantáneas y por tanto constantes definidas éstas y el tiempo de evaluación. Mientras que si aplicamos el método alternativo propuesto por la EHE, se puede apreciar como varía ésta en función de las variables antes descritas y dado el caso puede pasar que no sea seguro el método del coeficiente multiplicativo. Ha de tenerse en cuenta que al comparar esta flecha, se está mostrando una parte de flecha instantánea más otra diferida, pero que al final ésta es la flecha de diseño que se limita según las normativas. Así, para cada gráfica se ha mostrado diferentes relaciones de cargas, variando r entre 0.2 y 0.6. Para r bajo ha de darse cuenta que hay una gran parte de flecha instantánea mientras que la repercusión de la flecha diferida es menor y viceversa. Esto es fácilmente apreciable en todas las figuras mostradas, donde al bajar la relación r se desplaza la línea verticalmente y la variación en función del producto np se hace menos acusada. Ahora bien, si nos centramos en el coeficiente de fluencia es fácilmente apreciable que un incremento de éste hace que la flecha diferida sea más importante. Esto es, la variación de la flecha activa (o lo que es lo mismo, la pendiente de la curva) se hace mas pronunciada respecto al producto np . Mientras que un incremento de la deformación por retracción provoca una translación vertical de la curva al ser un término añadido en la ecuación.

8.2.4.4 Conclusiones del estudio comparativo

Este estudio se ha centrado en el análisis de la flecha diferida. Para ello, se ha estudiado la conveniencia de aplicar el método del coeficiente multiplicativo de la flecha instantánea a elementos armados con material compuesto polimérico, pues es comúnmente utilizado por la mayoría de las normas (ACI, EHE). Para ello se ha comparado con el método alternativo propuesto por la EHE que contempla, además del tiempo en el que evalúa la flecha diferida, una serie de variables que dependen de las propiedades de los materiales que forman el elemento y de las condiciones externas. Como conclusiones de este estudio comparativo se puede extraer:

- El uso de un único coeficiente multiplicativo de la flecha instantánea conlleva una serie de simplificaciones y suposiciones que no tiene en cuenta mucha de las variables de las que depende. Por ello, el método alternativo propuesto por la EHE es capaz de ajustarse a un espectro mayor de casos e incluso pudiendo acoger en su formulación las diferencias que conlleva el armado con barras de

FRP.

- Las propiedades de los elementos, las condiciones externas así como la geometría del mismo, influyen fuertemente en la flecha diferida para un determinado tiempo de evaluación.
- El módulo elástico de los FRP es sensiblemente inferior al acero, lo que conlleva a que el término de flecha diferida por fluencia cambie drásticamente. Esto acompañado a que la resistencia de los FRP suelen ser superiores provoca que aún haya más discrepancia en este término.
- La utilización de un coeficiente multiplicativo único puede conducir a valores inadecuados de las deformaciones diferidas. Concretamente para el caso de altos coeficientes de fluencia, de retracción, y longitud del elemento, se puede obtener deformaciones superiores a las predicha para altos valores del producto $\eta\rho$.

8.3 Estado límite de fisuración

8.3.1 Introducción

En esta sección sólo se concibe el más común de los tipos de fisuras que es la fisuración transversal debido a solicitaciones normales a tracción.

La abertura de fisura es principalmente función de la deformación del refuerzo de espacio entre fisuras contiguas y del recubrimiento del refuerzo. La complejidad del fenómeno y de modelizarlo matemáticamente lleva a que muchos investigadores difieran sobre la correcta formulación. En general los siguientes puntos son aceptados:

- La abertura de fisura es función de la deformación del refuerzo, aproximadamente se acepta que tienen una relación lineal.
- El recubrimiento hormigón alrededor del refuerzo tiene una notable influencia en la abertura de fisura.
- El ancho de fisura es función del espacio entre fisuras hasta un cierto límite.
- La abertura de fisura y espacio entre ellas son variables en magnitud y siguiendo aproximadamente un distribución normal.

Similar a lo que ocurre con las deformaciones, la fisuración en piezas armadas con FRP a flexión, tienden a desarrollar mayores aberturas que las de acero. De nuevo esto se debe al bajo módulo elástico y, en ciertos casos, a las posibles discrepancias de adherencia. Hay que entender también que, los FRP están exentos de corrosión, luego la fisuración del elemento tiene menor relevancia en cuanto a durabilidad del refuerzo se refiere. Por ello más que un tema de diseño estructural, la limitación atiende más bien a fines estéticos, pudiendo relajar la limitación aplicada al acero.

A continuación se muestran dos metodologías de cálculo: una desarrollada por el código ACI; y otra utilizando la formulación de la EHE, que como indica el Task group 9.3 es totalmente válido para el armado con FRP.

8.3.2 Abertura de fisura según el código ACI

Experimental y teóricos estudios han indicado que, la bien conocida ecuación de Gegerly-lutz [23], utilizado para el armado convencional, puede ser modificado para dar una razonable estimación de abertura de fisura en refuerzos de FRP. La ecuación original está basada en un análisis estadístico para determinar la máxima probable abertura. Véase a continuación:

$$w = 2.2 \cdot \beta \cdot \epsilon_s \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A_e} \quad (8.46)$$

Esta ecuación es proporcional a la deformación del refuerzo y por tanto puede ser ajustada para predecir la abertura máxima en elementos a flexión sin más que sustituir la deformación del acero por la del FRP.

$$w = \frac{2.2 \cdot \beta \cdot f_f}{E_f} \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A_e} \quad (8.47)$$

Cuando las barras de FRP tienen una similar adherencia respecto a las de acero, esta ecuación aproxima suficientemente bien la abertura máxima. No obstante, cuando la adherencia es superior esta ecuación puede sobreestimar la anchura de fisura y viceversa. Por tanto, para hacer esta expresión más genérica es necesario introducir un coeficiente correctivo de la cualidad de la adherencia k_b . Luego queda:

$$w = \frac{2.2 \cdot \beta \cdot k_b \cdot f_f}{E_f} \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A_e} \quad (8.48)$$

Donde:

$$\beta = \frac{h - k \cdot d}{d \cdot (1 - k)} \quad (8.49)$$

$$\begin{aligned} k_b &= 1 && \text{si adherencia similar al acero} \\ k_b &> 1 && \text{si adherencia deficiente} \\ k_b &< 1 && \text{si adherencia buena} \end{aligned} \quad (8.50)$$

$$f_f = \frac{M_s}{A_f \cdot d \cdot \left(1 - \frac{k}{3}\right)} \quad (8.51)$$

$$A_e = \frac{2 \cdot d_c \cdot b}{n} \quad (8.52)$$

Más tarde el código ACI 440.1R-06 modificó la formulación, basándose ahora en la ecuación de Frosch [24].

$$w = 2 \cdot \frac{f_f}{E_f} \cdot \beta \cdot k_b \cdot \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (8.53)$$

Donde:

$$s = \frac{b}{n} \quad (8.54)$$

Notación:

w = Abertura máxima de fisura en mm.

β = Relación entre la distancia de la fibra neutra al extremo de la sección a tracción y la distancia de la fibra neutra al centro de gravedad del refuerzo.

k_b = Coeficiente corrector de la calidad de la adherencia de las barras de FRP.

f_f = tensión del refuerzo

d_c = Recubrimiento mecánico del refuerzo. Distancia del extremo tensionado de la sección al centro de gravedad de los refuerzos, en mm.

A_e = Área de tracción efectiva del hormigón, definida como el área de hormigón que tiene el mismo centro que los refuerzos, dividida por el número de barras, en mm²

k = Relación entre la profundidad de la fibra neutra y el canto útil de la sección

s = Separación media entre barras, en mm.

n = Número de barras a tracción.

8.3.2.1 Limitación de abertura máxima

A continuación se expone un tabla que informa sobre la abertura máxima permisible.

Material	Exposición	$W_{m\acute{a}x}$ (mm)
Acero	Interior	0.4
Acero	Exterior	0.3
FRP	Interior	0.7
FRP	Exterior	0.5

Tabla 8.4: Limitación de abertura máxima

8.3.3 Abertura de fisura según la EHE

La normativa española sobre el cálculo de la abertura máxima de fisura es totalmente análoga al Eurocódigo 2. Su formulación es extraordinariamente compleja, donde entra en juego multitud de variables que influyen en la anchura de fisura. Principalmente se basa, también, en la deformación del refuerzo, teniendo en cuenta además la separación media entre fisuras. Por lo tanto, según el Task group 9.3 esta ecuación puede ser directamente aplicada a los refuerzos con FRP introduciendo unos coeficientes para que valoran la adherencia del mismo. Véase a continuación su formulación:

$$w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{fm} \quad (8.55)$$

Cálculo de la separación medio ente fisuras, s_m :

$$s_m = 2 \cdot c + 0.2 \cdot s + 0.4 \cdot k_1 \cdot \beta_1 \cdot \frac{\phi \cdot A_{c,eficaz}}{A_f} \quad (8.56)$$

Cálculo de la deformación del refuerzo:

$$\varepsilon_{fm} = \frac{\sigma_f}{E_f} \left[1 - k_2 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{fr}}{\sigma_f} \right)^2 \right] > 0.4 \cdot \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (8.57)$$

Donde:

$$\sigma_f = \frac{M_a}{0.8 \cdot d \cdot A_f} \quad (8.58)$$

$$\sigma_{fr} = \frac{M_f}{0.8 \cdot d \cdot A_f} \quad (8.59)$$

$$M_f = f_{ct.m.fl} \cdot W_b \quad (8.60)$$

$$W_b = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (8.61)$$

Notación

w_k = Abertura característica de fisura, en mm.

β = Coeficiente que relaciona la abertura media de fisura con el valor característico, y vale 1,3 para fisuración producida por acciones indirectas solamente y 1,7 para el resto de los casos.

s_m = Separación media de fisuras, expresada en mm.

ε_{fm} = Alargamiento medio de los refuerzos horizontales, teniendo en cuenta la colaboración del hormigón entre fisuras.

s = Distancia entre barras longitudinales. Si $s > 15 \phi$ se tomará $s = 15 \phi$.

En el caso de vigas armadas con n barras, se tomará $s = b/n$ siendo b el ancho de la viga.

c = Recubrimiento de la armadura inferior

k_1 = Coeficiente que representa la influencia del diagrama de tracciones en la sección.

En el caso de flexión este valor es de 0.125

$A_{c,eficaz}$ = Área de hormigón de la zona de recubrimiento, en donde las barras a tracción influyen de forma efectiva en la abertura de las fisuras.

A_f = Sección total de los refuerzos situados en el área $A_{c,eficaz}$.

σ_f = Tensión de servicio de la armadura pasiva en la hipótesis de sección fisurada.

k_2 = Coeficiente de valor 1,0 para los casos de carga instantánea no repetida y 0,5 para los restantes.

σ_{fr} = Tensión de la armadura en la sección fisurada en el instante en que se fisura el hormigón, lo cual se supone que ocurre cuando la tensión de tracción en la fibra más traccionada de hormigón alcanza el valor $f_{ct.m.fl}$.

M_f = Momento de fisuración.

W_b = Módulo resistente de la sección bruta respecto a la fibra extrema en tracción.

β_1 = Coeficiente que considera las propiedades de adherencia de las barras, siendo 1 para el caso similar al acero corrugado y mayor que uno para caso de adherencia deficiente

β_2 = Coeficiente que tiene en cuenta las propiedades de adherencia de las barras, siendo 1 para el caso similar al acero corrugado y menor a la unidad para caso de adherencia deficiente

8.4 Comprobación del creep

El creep es un fenómeno de fluencia del refuerzo que experimenta deformaciones a lo largo del tiempo a estar sometido a una carga de larga duración. Esta fluencia del material debilita al mismo pudiendo fallar aún estando tensionado por debajo del límite de rotura. Por ello, a efectos de durabilidad, se suele tener en cuenta este efecto reduciendo la tensión límite así como su deformación. En el caso del código ACI, esta reducción no interviene en el diseño inicial debido a que no pretende interferir en el modo de fallo de diseño a corto periodo. Esto es, se diseña sin tener en cuenta esta reducción y luego comprueba que la tensión límite de creep no es alcanzada por las cargas de servicio aplicadas. Sin embargo, otros códigos integran de manera directa esta reducción de propiedades en el diseño (no teniéndose que comprobar a posteriori el fenómeno de creep). Estas normas se basan en que las modificaciones de propiedades (y por tanto modificación del modo de fallo de diseño) a corto periodo debido a efectos de largo periodo se posicionan del lado de la seguridad siendo plausible un diseño conjunto. Este último procedimiento es el que se aconseja en este documento y el que se utiliza en la adaptación de la EHE.

No obstante en lo que respecta a la normativa ACI, se debe verificar:

$$F_{f,s} \geq f_{f,s} \tag{8.62}$$

Donde:

$$f_{f,s} = M_s \cdot \frac{n_f \cdot d \cdot (1 - k)}{l_{cr}} \tag{8.63}$$

Siendo:

$F_{f,s}$ = Tensión límite por creep determinada por la tabla siguiente

$f_{f,s}$ = Tensión del refuerzo bajo las cargas de servicio

Tabla 8.5: Tensión límite por creep de los FRP.			
Tipo de fibra	GFRP	AFRP	CFRP
Tensión límite por creep	0.2 f_{fu}	0.3 f_{fu}	0.55 f_{fu}