

5 CAPÍTULO

COMPOSICIÓN, PROPIEDADES Y CARÁCTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

ÍNDICE

5	CAPÍTULO: COMPOSICIÓN, PROPIEDADES Y CARÁCTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	30
5.1	BARRAS POLIMÉRICAS REFORZADAS CON FIBRA (FRP)	30
5.1.1	<i>Composición</i>	30
5.1.1.1	Introducción.....	30
5.1.1.2	Fibras	30
5.1.1.2.1	Fibras de vidrio.....	31
5.1.1.2.2	Fibras de carbono.....	31
5.1.1.2.3	Fibras de aramida.....	31
5.1.1.2.4	Fibras basálticas.....	32
5.1.1.3	Matriz polimérica	32
5.1.1.3.1	Termoendurecibles.	32
5.1.1.3.2	Termoplásticos.....	33
5.1.2	<i>Propiedades</i>	34
5.1.2.1	Introducción.....	34
5.1.2.2	Propiedades físicas.....	34
5.1.2.2.1	Densidad	34
5.1.2.2.2	Coefficiente de expansión térmica.....	34
5.1.2.3	Efectos de la temperatura sobre las barras de FRP.....	35
5.1.2.4	Propiedades mecánicas a corto periodo	36
5.1.2.4.1	Propiedades a tracción.....	36
5.1.2.4.2	Propiedades a compresión.....	38
5.1.2.4.3	Propiedades a cortante.....	39
5.1.2.5	Propiedades a largo plazo.....	39
5.1.2.5.1	General.....	39
5.1.2.5.2	Creep.....	39
5.1.2.5.3	Ensayo de fluencia	40
5.1.2.5.4	Fatiga	44
5.1.3	<i>Características</i>	45
5.1.3.1	Introducción.....	45
5.1.3.2	Resistencia de cálculo del refuerzo.....	45
5.1.3.3	Deformación última de cálculo	46
5.1.3.4	Diagrama tensión deformación de cálculo de los FRP.....	46
5.2	CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN.....	47
5.2.1	<i>Tipificación de los hormigones</i>	47
5.2.2	<i>Resistencia a compresión del hormigón</i>	48
5.2.3	<i>Resistencia a tracción</i>	49
5.2.4	<i>Resistencia de cálculo</i>	50
5.2.5	<i>Diagrama tensión deformación de cálculo</i>	50
5.2.5.1	Diagrama parábola rectángulo	50
5.2.5.2	Diagrama rectangular.....	52
5.2.6	<i>Módulo de deformación longitudinal</i>	54
5.2.7	<i>Retracción y fluencia</i>	56
5.2.8	<i>Coefficiente de Poisson</i>	56
5.2.9	<i>Coefficiente de dilatación térmica</i>	56

5 CAPÍTULO: COMPOSICIÓN, PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

5.1 BARRAS POLIMÉRICAS REFORZADAS CON FIBRA (FRP)

5.1.1 Composición

5.1.1.1 Introducción

En general las barras poliméricas reforzadas con fibra están hechas de continuas fibras embebidas en una en una matriz polimérica. Las fibras son el fondo resistente del elemento mientras que la matriz es el vínculo que une todas las fibras y las protege.

La misión de las fibras es dotar al elemento de las principales características mecánicas resistentes donde su módulo elástico es mayor que el de la matriz y deformación última es menor. De esta forma asegura que las tensiones son transferidas desde la matriz a las fibras sin aparecer fisuras o grietas en la matriz que conlleve a un prematuro deterioro del conjunto.

Así pues, las funciones de la matriz son: medio de unión entre las fibras y protegerlas del daño durante su fabricación, transporte y puesta en obra; dispersar las fibras y separarlas; transferir las tensiones a las fibras; protegerla del ambiente. Además hay que asegurarse que tanto la matriz como la fibra son químicamente compatibles.

Queda mencionar algunas características del conjunto matriz-fibra, como la buena resistencia a ambientes agresivos, o la no utilización bajo altas temperaturas que degradan la matriz, la reblandecen y es incapaz de transferir cargas a la fibra. Es importante también el vínculo entre la barra y el hormigón, por ello se suele dotar superficialmente de un ribeteado que mejora la adherencia entre estos elementos. Por el contrario, estos refuerzos tienen la incapacidad de ser doblados en obra de manera que los posibles dobleces de diseño deben ser prefabricados con la consiguiente disminución de resistencia mecánica.

5.1.1.2 Fibras

El uso de las fibras es debido principalmente a sus buenas características de resistencia rigidez y ligereza. Como detalle mencionar que las fibras son mucho más fuertes que un bloque hecho del mismo material. Esto es debido a su preferencial orientación de las moléculas a lo largo de la dirección de la fibra y su reducido número de defectos presentes comparado con el bloque. En general las características que se le exigen a la fibra son: alto módulo elástico; alta tensión de rotura a tracción junto con una adecuada deformación; escasa variación de resistencia y rigideces entre las diferentes fibras; estabilidad de las propiedades durante la fabricación; uniformidad de

los diámetros de las mismas; capacidad de adaptarse a diferentes formas.

Las fibras más comunes utilizadas son las de vidrio, las de carbón y las de aramida. Todas ellas presentan un comportamiento elástico lineal hasta la rotura.

5.1.1.2.1 Fibras de vidrio

Son comúnmente utilizadas en los refuerzos destacando de ellas que tienen: una buena relación resistencia/peso; buena estabilidad dimensional; buena resistencia al calor y al frío; buena resistencia a la humedad y a la corrosión; y lo más importante su coste suele ser menor que las demás. No obstante tienen un menor módulo elástico lo que conlleva a grandes deformaciones para alcanzar su capacidad última. Hay varios tipos de fibra de vidrio: E-glass; S-glass; alcalino-resistente-glass. El primero de ellos es el más barato y debido a ello es ampliamente utilizado, mientras que el S-glass tiene mejores cualidades en cuanto a resistencia y mayor módulo elástico. Sin embargo, el alcalino-resistente, como su palabra dice, es utilizado para mejorar la durabilidad ante ambientes alcalinos como los que forma el cemento. Por último cabe destacar de ellas que todas exhiben un comportamiento isótropo y sus características son estables en un buen rango de temperaturas.

5.1.1.2.2 Fibras de carbono

Las fibras de carbono están compuestas por cristales de grafitos formado por átomos de carbono que se ordenan en redes hexagonales donde la ordenación de sus capas (preferentemente paralelas a la dirección del eje de la fibra) es fundamental para determinar su resistencia y módulo. Normalmente se obtiene de una base de poliacrilonitrilo con diferentes formas de procesado para conseguir esta buena orientación buscada. En general estas fibras suelen presentar unas mejores características que las de vidrio teniendo una resistencia similar o algo superior pero un mayor módulo elástico que provoca menor grado de elongación para desarrollar toda su capacidad. Mencionar que son capaces de soportar grandes temperaturas (hasta los 2000°C) manteniendo sus características, hecho que no es aprovechable porque la matriz que la envuelve no es capaz de soportar estas elevadas temperaturas sin que se deteriore o se reblandezca. Además, poseen una gran resistencia hacia ambientes agresivos e insensibles al creep. Por último cabe comentar la anisotropía que mantiene, lo que le hace variar sus características según la dirección, y el elevado coste de la misma, cuya repercusión es que se utilice sólo en determinadas aplicaciones de alta exigencias.

5.1.1.2.3 Fibras de aramida

Con este nombre se designa genéricamente a un grupo de fibras orgánicas que tienen un índice alto de tensión-peso. En general tienen una resistencia a la tracción alta con un módulo elástico similar a las de vidrio y que, a diferencia de éstas, tienen un comportamiento anisótropo. Un tipo de fibra muy utilizado es el kevlar. Entre sus principales ventajas están: gran resistencia a impactos a diferencia de lo que ocurriría con otras fibras que son más frágiles; buena resistencia a la fatiga; buen comportamiento ante el creep; y soporta temperaturas relativamente elevadas (180°C

manteniendo el 80% de su resistencia original). No obstante son sensibles a la luz UV y a algunos ácidos y alcalinos.

5.1.1.2.4 Fibras basálticas

Son materiales provenientes de depósitos de lava fundida. Presentan mejores características que las fibras de vidrio pero son más baratas que las de carbón. Entre sus especiales cualidades son la gran resistencia al fuego y resistencia a ambientes químicamente activos. Por lo que su principal utilización es en aplicaciones que demandan una alta resistencia a elevadas temperatura.

Propiedades generales de algunas fibras según [16]:

Propiedades	Unidades	Carbono base pan tipo I	Carbono base pan tipo II	Vidrio E	Kevlar 49 poliamida aromáticas
Diámetro	µm	7,0 - 9,7	7,6 - 8,6	8,14	11,9
Densidad	10 ³ kgm ⁻³	1,95	1,75	2,56	1,45
Módulo de Young	GPa	390	250	76	125
Módulo (perpendicular al eje de la fibra)	GPa	12	20	76	
Resistencia a tracción	GPa	2,2	2,7	1,4-2,5 (típica) 3,5 (estirado recientemente)	2,8 - 3,6
Alargamiento en rotura	%	0,5	1,0	1,8 - 3,2	2,2 - 2,8

5.1.1.3 Matriz polimérica

La matriz es un polímero que desempeña básicamente dos funciones, una estructural y otra de protección. Tanto es así que la matriz ocupa sobre el 50% del volumen total por lo que sus propiedades afectan fuertemente al conjunto. Entre las funciones estructurales se encuentran la de unir todas las fibras, transferir y distribuir la carga entre ellas. Además protege a las fibras de ataques medioambientales y mecánicos exteriores debido a la manipulación de éstas. Todo ello conlleva a una minuciosa elección de la matriz dependiendo de la aplicación que se le designe. Hay dos clases de matrices poliméricas, las termoendurecibles y los termoplásticos

5.1.1.3.1 Termoendurecibles.

Estos están formados por largas cadenas unidas entre si por uniones covalentes formando redes o armazones. No pueden ser refundidos, si se calientan después de su curado llegan a degradarse y descomponerse. Sus propiedades más generales son: la estabilidad de sus característica mecánicas frente a la temperatura; dureza; fragilidad; y relativo bajo coste. Los termoendurecibles más comunes en ingeniería civil

son los epoxi, los poliésteres y los vinilésteres.

Las principales características de los polímeros epoxi son: altas propiedades mecánicas; poca contracción durante el curado lo que le dota de buena adhesión con las fibras, alta resistencia química; y es afectado poco por la humedad, el agua y la temperatura. No obstante, sus principales desventajas son su poca tenacidad y alto coste respecto a los demás termoendurecible debido al largo tiempo de curado necesario. Mencionar que los epoxi pueden ser fabricados en una amplia variedad de rigideces.

Las ventajas de los poliésteres son: gran rapidez de curado y por tanto abaratamiento de costes; mejor adaptabilidad a las condiciones exteriores; buena durabilidad; y resistencia a la corrosión. Mientras que sus desventajas principales son: la contracción que presentan durante el curado lo que reduce la capacidad de adhesión con las fibras; y gran difusión de humedad desprotegiendo a las mismas.

Por último, los vinilésteres son un compendio entre las propiedades de los epoxi y los poliésteres, siendo los costes inferiores a los epoxi. Ello conlleva a que sean los preferentemente escogidos para los FRP. Estos exhiben algunos beneficios de los epoxi como su buena resistencia química (resistencia a ácidos, alcalinos y disolventes), buenas propiedades mecánicas así como poca afectabilidad por la humedad y agua. Además de otros beneficios de los poliéster como su rápido curado. También presentan una mayor flexibilidad y tenacidad. Por contra presenta una peor resistencia de adhesión respecto a los epoxi. En conclusión son ampliamente utilizados para los refuerzos con fibra de vidrio.

Tabla 5.2: Propiedades generales de la matriz termoendurecible

	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
Poliéster	1200-1400	34.5-100	2.1-3.45
Epoxi	1200-1400	55-130	2.75-4.10
Viniléster	1150-1350	73-81	3-3.5

5.1.1.3.2 Termoplásticos

Estos polímeros tienen menor fuerza de unión entre sus cadenas. Ello es debido a que el vínculo que las une es a través de débiles fuerzas secundarias y mecánicas (cruce de unas cadenas con otras). Presentan una temperatura a partir de la cual se vuelven suficientemente viscosos para poderse reformar volviendo a estado sólido una vez enfriados sin pérdidas significativas de sus propiedades. Su procesado es complicado (pues poseen una alta viscosidad en el conformado) de manera que hay que asegurar el buen contacto entre las fibras y la resina. Mientras que las principales ventajas son la posible reparación de éstos y mayor tenacidad que presentan. El más utilizado es el PEEK ya que posee buenas propiedades mecánicas. En cambio el PPS es un termoplástico con muy buena resistencia química. Mientras que el PSUL presenta una gran elongación hasta el fallo y excelente estabilidad ante el calor y la humedad.

Tabla 5.3: Propiedades generales de la matriz termoplástico.

	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación en rotura (%)
PEEK	1320	100	3.24	50
PPS	1360	82.7	3.30	5
PSUL	1240	70.3	2.48	75

5.1.2 Propiedades

5.1.2.1 Introducción

El uso de los FRP en el hormigón está fuertemente influenciado por las propiedades físicas y mecánicas del mismo. Pero debido a la variedad de componentes, a los tipos de procesado, a la calidad y control durante la fabricación, a la fracción volumétrica entre fibra y matriz, etc., se puede manufacturar FRP adecuados para cada aplicación específica. No obstante la historia de carga y duración de cargas así como temperatura y humedad también puede afectar a dichas propiedades.

5.1.2.2 Propiedades físicas

En general las propiedades físicas de un FRP vienen definido por los elementos constituyentes y por las fracciones volumétricas y másicas tal como informa [Fib task Group 9.3]

v_f = Volumen de fibra
 v_m = Volumen de matriz
 v_c = Volumen de composite
 m_f = Masa de la fibra
 m_m = Masa de la matriz
 m_c = Masa de composite

V_f = Fracción volumétrica de fibra
 V_m = Fracción volumétrica de matriz
 M_f = Fracción másica de la fibra
 M_m = Fracción másica de la matriz

$$v_c = v_f + v_m \quad (5.1)$$

$$m_c = m_f + m_m \quad (5.2)$$

$$V_f = v_f/v_c \quad V_m = v_m/v_c \quad (5.3)$$

$$M_f = m_f/m_c \quad M_m = m_m/m_c \quad (5.4)$$

5.1.2.2.1 Densidad

La densidad puede ser obtenida en términos de las fracciones constituyentes y de las propiedades de éstos, de manera que se puede escribir:

$$\rho_c := \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad \begin{array}{l} \rho_m = \text{Densidad de la matriz} \\ \rho_f = \text{Densidad de la fibra} \\ \rho_c = \text{Densidad del composite} \end{array}$$

5.1.2.2.2 Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica (CET) depende del tipo de fibra, matriz y de las fracciones volumétricas. Las matrices poliméricas se consideran que tienen un comportamiento isótropo a igual que la fibra de vidrio, mientras que la fibra de carbón y aramida se consideran ortótropo. El longitudinal CET (α_L) es dominado por las propiedades de las fibras mientras que el transversal CET (α_T) es dominado por las de

la matriz.

Para el caso de constituyentes isótropos las siguientes expresiones determinan los principales CET:

$$\alpha_L := \frac{E_f \cdot V_f \cdot \alpha_f + E_m \cdot V_m \cdot \alpha_m}{E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m} \quad (5.5)$$

$$\alpha_T := (1 + \nu_m) \cdot V_m \cdot \alpha_m + (1 + \nu_f) \cdot V_f \cdot \alpha_f - \alpha_L \cdot \nu_{LT} \quad (5.6)$$

$$\nu_{LT} := \nu_f \cdot V_f + \nu_m \cdot V_m \quad (5.7)$$

Donde E corresponde con el módulo de Young, α como el coeficiente de expansión y ν el coeficiente de Poisson con el subíndice de cada constituyente. Mencionar que el la última ecuación representa el coeficiente de Poisson de la matriz.

Para el caso de fibras ortótropas tanto el módulo de Young como el coeficiente de expansión térmica varían según la dirección longitudinal y transversal. Así pues los CET principales del FRP son:

$$\alpha_L := \frac{E_{fL} \cdot V_f \cdot \alpha_{fL} + E_m \cdot V_m \cdot \alpha_m}{E_{fL} \cdot V_f + E_m \cdot V_m} \quad (5.8)$$

$$\alpha_T := V_f \cdot \alpha_{fT} + V_m \cdot \alpha_m + V_f \cdot \nu_{fLT} \cdot (\alpha_{fL} - \alpha_L) + V_m \cdot \nu_m \cdot (\alpha_m - \alpha_L) \quad (5.9)$$

Véase una tabla con los CET más habituales de los FRP comparado con el acero:

Tabla 5.4:CET habituales				
DIRECCIÓN	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			
	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal	11	6 a 10	-9 a 0	-2 a -6
transversal	11	21 a 23	74 a 104	60 a 80

Donde los coeficientes negativos significan que se contrae con la temperatura. Hay que tener en cuenta que los FRP están embebidos y unidos al hormigón y pueden presentar problemas, apareciendo tensiones térmicas, si sus coeficientes de expansión son muy diferentes. En concreto el hormigón suele tener un coeficiente de entre 7 y $13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ y que además se considera como isótropo. Como se puede ver el acero presenta un coeficiente similar y también es isótropo, por contra los FRP presentan coeficientes bastante distintos salvo la fibra de vidrio que longitudinalmente es bastante similar. Por tanto a efectos de variaciones significativas de temperatura y por tanto expansión térmica habría que estudiar los efectos sobre el vínculo FRP y hormigón.

5.1.2.3 Efectos de la temperatura sobre las barras de FRP

Según resultados de varios ensayos bajo elevadas temperaturas se ha encontrado que los FRP poseen una temperatura de reblandecimiento (T_g), a partir de la cual, el

conjunto se debilita y empieza a perder sus propiedades. Esta temperatura depende del FRP que se trate, no obstante el principal elemento que gobierna esta temperatura es la matriz debido a que las fibras son capaces de soportar mucho mayores temperaturas que éstas. Así, hablando en términos generales, los valores de T_g para el poliéster son entre 70-100°C; para el viniléster de 70-163°C; y para el epoxi de 95-175°C. Por ello a efectos de diseño se recomienda que esta temperatura de pérdida de propiedades sea 30°C superior a la temperatura máxima esperada.

La unión del hormigón y los refuerzos dependen de las propiedades de la matriz así como físicamente la superficie de ésta. Cuando alcanzamos temperaturas entorno a la temperatura de reblandecimiento, la matriz se vuelve más viscosa y reduce considerablemente sus propiedades. El vínculo entre las fibras y la matriz se deteriora, por lo que la matriz se ve incapaz de transmitir y repartir los esfuerzos desde el hormigón a las fibras, que son las principales responsables de la resistencia del FRP. Todo esto provoca que se reduzca de manera considerable la resistencia del conjunto y otros efectos como incrementos de la flecha o abertura de grietas que pueden llevar incluso al colapso de la estructura. Para evitar el colapso bajo altas temperaturas los anclajes finales deben de ser mantenidos y no reblandecidos.

Otra cuestión a tener en cuenta en elementos reforzados por FRP es que presentan un coeficiente de dilatación transversal muy diferente al del hormigón. Este hecho conlleva a que, bajo una variación de la temperatura, puedan aparecer tensiones en el hormigón circundante que conlleve a micro-grietas que afecten a la unión con las barras de FRP.

No sólo las temperaturas elevadas pueden afectar a los refuerzos, sino también temperaturas extremadamente bajas pueden sobre-endurecer la matriz apareciendo grietas que afectan a la integridad de la unión fibra-matriz.

5.1.2.4 Propiedades mecánicas a corto periodo

Las propiedades mecánicas pueden ser determinadas por medidas experimentales. Estos experimentos deben ser concretos para un tipo de FRP, su proceso de fabricación y su diámetro de barra. Si una de estas variables cambia es necesario volver a experimental para obtener las nuevas características. Este proceso obviamente es costoso por lo que también se puede estimar las características por medio de las propiedades de los elementos constituyentes.

5.1.2.4.1 Propiedades a tracción

La principal forma de trabajo de los FRP es a tracción. Disponiéndose la dirección de las fibras en la dirección del eje tracción de las barras. Los factores que influyen en las propiedades a tracción son: Las propiedades de los constituyentes; la fracción volumétrica; la distribución de los elementos; físicas y químicas interacciones; proceso de fabricación; y control de calidad de la misma.

Como se puede ver son muchas las variables que entran en juego para determinar las propiedades del composite (tensión última y módulo elástico). No obstante según la literatura, se puede obtener estas propiedades a través de sus constituyentes y de su proporción volumétrica. Estas propiedades obviamente son estimativas donde la fibra

aporta la mayor parte de la resistencia y módulo, mientras que la matriz la complementa y distribuye uniformemente los esfuerzos.

Según la literatura se puede estimar el módulo elástico y resistencia a tracción en la dirección de las fibras de este modo:

$$E_L = E_{fL} \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) \tag{5.10}$$

$$f_i = f_{fi} \cdot [V_f + E_m \cdot (1 - V_f) / E_f] \tag{5.11}$$

Donde E demarca el módulo con el subíndice correspondiente al constituyente y f_{fi} la resistencia longitudinal de la fibra. Considerar que en el caso de AFRP y CFRP su comportamiento es ortótropo y sus propiedades cambian según la dirección.

Véase una tabla comparativa genérica de las propiedades de los diferentes FRP

Tabla 5.5: Propiedades genéricas de los FRP				
PROPIEDADES	MATERIAL			
	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Módulo long (GPa)	200	35-65	100-580	40-125
Resistencia tracción longitudinal ^a	450-700	450-1600	600-3500	1000-2500
Deformación última	5-20	1.2-3.7	0.5-1.7	1.9-4.4

Véanse también unas curvas de comportamiento a tracción de los diferentes FRP.

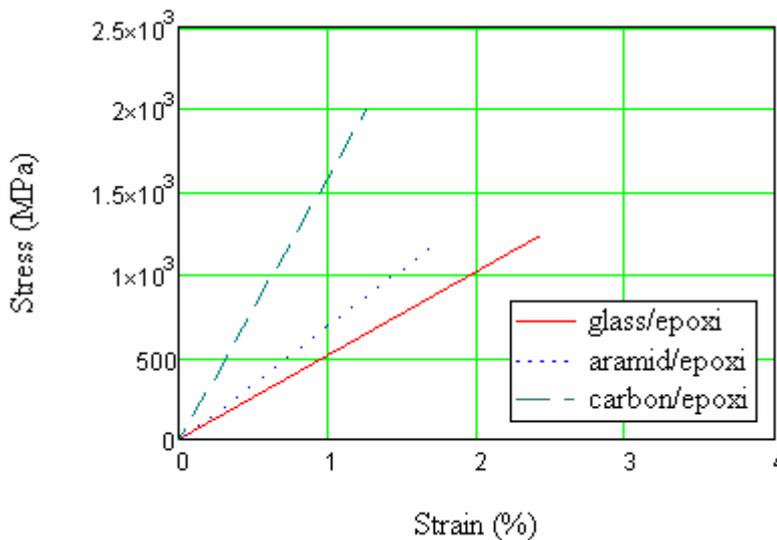


Fig. 5.1: Diagrama de comportamiento de diferentes FRP

Como se ha mencionado antes, realmente es complejo y entran en juego muchas variables para determinar las propiedades mecánicas. Por ello se recurren a métodos experimentales debidamente estandarizados y aprobados por las normativas para establecer un patrón común que determine estas características. A pesar de que todas estas variables sean comunes para un determinado FRP, las propiedades pueden cambiar de una barra a otra por lo que es necesario hacer una valoración estadísticas para establecer su desviación y media. Tanto es así, que este análisis debe de ser hecho para cada diámetro de barra siendo usual que las propiedades de las mismas

mengüen a medida que el diámetro se incrementa. Por ello es habitual que los fabricantes proporcionen tablas de propiedades mecánicas según el diámetro de la barra a disponer.

Véase una tabla ejemplo de un fabricante para barras de fibra de vidrio [FiberGlassRebar]:

Barra(mm)	Diámetro (mm)	Resistencia característica (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
6	6,4	788	46,1
9	9,5	765	46,2
13	12,7	710	46,4
16	15,9	683	48,2
19	19,0	656	47,6
22	22,2	625	46,4
25	25,4	611	51,0

Composición del producto:

Un compuesto de gran resistencia a la corrosión formado por barras corrugadas de matriz viniléster reforzado con fibras de vidrio, y con una capa de arena de cuarzo para mejorar la adherencia al hormigón.

Características:

- Impermeable al ataque de cloruros (sal) y agentes químicos comunes.
- Resistencia característica de casi el doble que la de una barra normal de acero.
- Transparencia hacia campos electromagnéticos y radio frecuencias.
- Peso aproximado de 1/4 del peso de una barra de acero equivalente.
- No conductor eléctrica ni térmicamente.

5.1.2.4.2 Propiedades a compresión

No es recomendado utilizar los FRP a compresión, no obstante es necesario estudiar brevemente su comportamiento y establecer algunas sus características a compresión.

Cuando los FRP son comprimidos los modelos de fallos cambian respecto a tracción. De esta forma los principales modos de fallo son: debido a los micro-pandeo de las fibras dentro de la matriz; fractura transversal por deformación de Poisson; fallo de las fibra por cortante.

Debido a todas estas posibles y complicadas formas de fallo es difícil crear un modelo que prediga el fallo por compresión. Por ello se han elaborado muchos experimentos para caracterizar de manera aproximada su comportamiento, donde a priori hay que establecer las características del FRP empleado y el modo de ensayo ejecutado, pues de ello depende los resultados obtenidos. De manera general se ha obtenido que la resistencia a compresión es mucho menor que a tracción, e igualmente pasa con el módulo donde el prematuro fallo parece ser causado por el micro-pandeo de las fibras. Para obtener información más fiable a compresión es necesario acudir a tablas dadas por el fabricante teniendo especial cuidado en los tipos de ensayos empleados y acudiendo a grandes factores de seguridad.

5.1.2.4.3 Propiedades a cortante

La resistencia a esfuerzo transversal cortante del FRP es debida principalmente a la matriz pues este esfuerzo actuando en las fibras es apenas resistida por ellas. Es más, en el peor de los casos las fibras les supone un concentrador de tensiones a la matriz reduciendo la capacidad de la misma respecto a un bloque sin fibras. Para ayudar a la matriz se puede disponer de fibras dispuestas en dirección transversal aunque provoca una menor resistencia a esfuerzo axial. El modo de fallo común en los FRP es un agrietamiento de la matriz que conlleva al fallo. En lo que se refiere al diseño es conveniente notar que los FRP poseen una escasa resistencia a cortante y debe evitarse diseñar para resistir tales esfuerzos. Los datos referentes a resistencia a cortante son obtenidos por medio de experimentos estandarizados según las normas y dados por el fabricante.

5.1.2.5 Propiedades a largo plazo

5.1.2.5.1 General

El comportamiento del FRP a largo plazo difiere de manera notable del acero, pues en éste último el fenómeno de creep sólo se presenta para temperaturas bastante elevadas, mientras que para el composite (material compuesto polimérico reforzado con fibras) se manifiesta para temperaturas relativamente bajas incluso ambiental. Entendemos por comportamiento a largo plazo como la evolución de las deformaciones o de las tensiones a lo largo del tiempo. Es decir, es un fenómeno en el que el tiempo juega un papel fundamental.

Para estudiar esto se suele hacer ensayos de fluencia en el que se mantiene el nivel de tensión constante y se mide las deformaciones así con su velocidad. Otro ensayo habitual es la prueba de relajación que es justamente lo contrario.

Destacar que estos fenómenos de deformación viscosa no lineal se suelen dar en los metales a temperaturas elevadas y en algunos materiales no metálicos como los compuestos por una resina polimérica y fibras.

5.1.2.5.2 Creep

Con el nombre de creep se conoce al comportamiento viscoso no lineal de algunos materiales donde la velocidad de deformación no depende linealmente de las tensiones. Es decir, es un comportamiento en el que se produce una variación de las deformaciones a lo largo del tiempo (estando el material sometido a unas tensiones y temperaturas determinadas constantes o no) donde al cesar la carga en parte se recupera por deformación viscosa elástica (a veces es inexistente) quedando una deformación permanente visco plástica. Para caracterizar este fenómeno se recurre a ensayos de fluencia. [Evans R. W. and Wilshire, B.]

5.1.2.5.3 Ensayo de fluencia

Se denomina ensayo de fluencia a un ensayo de tracción a tensión y temperatura constantes (σ, T) en el que se evalúa $\varepsilon(t)$, que es la variación de deformación con el tiempo. Los resultados típicos de un ensayo de fluencia se representan en la figura siguiente. Antes de empezar a comentar la figura es necesario recordar el concepto de endurecimiento y reblandecimiento. Cuando representamos un diagrama ε - t , un periodo de endurecimiento se caracteriza por una disminución de la velocidad de deformación, es decir, por una disminución de la pendiente de la curva ε - t siendo mayor el endurecimiento cuanto mayor sea la variación de dicha pendiente, es decir, la derivada segunda de $\varepsilon(t)$, que es proporcional a la curvatura, que por tanto será negativa en un periodo de endurecimiento. Mientras que un periodo de reblandecimiento se caracteriza por un aumento de la velocidad de deformación, es decir una curvatura positiva.

En general se puede distinguir tres periodos en un ensayo de fluencia:

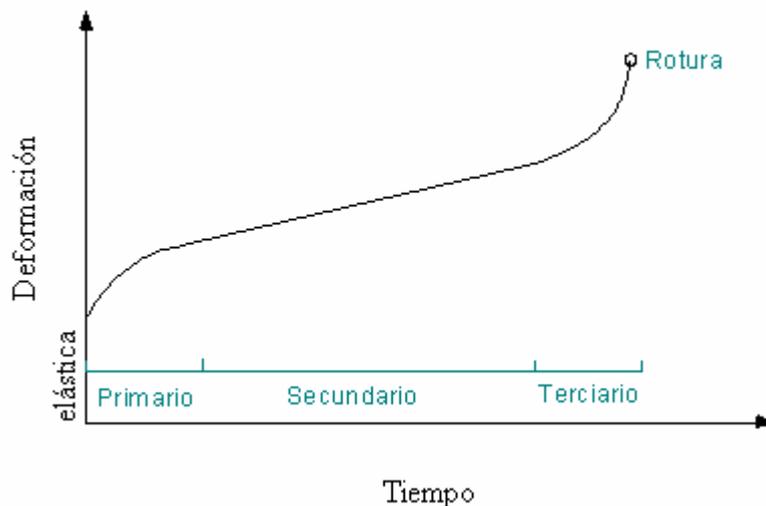


Fig 5.2: Creep

- Primario: En el que se produce un decrecimiento de la velocidad de deformación, es decir un endurecimiento decreciente del material.
- Secundario: En el que la velocidad de deformación es aproximadamente constante.
- Terciario: En el que se produce un reblandecimiento hasta la rotura del material.

5.1.2.5.3.1 Creep bajo tensiones constantes

El fenómeno de creep no se puede simular mediante modelo mecánicos como por ejemplo el modelo de Kelvin-Maxwell debido a la dependencia no lineal de las velocidades de deformación de creep respecto a las tensiones. Por ello las ecuaciones de deformaciones se han de desarrollar hasta ahora por medio de métodos empíricos buscando funciones que se ajusten a los resultados experimentales en los que para una tensión y temperatura constante se mide la deformación respecto al tiempo. Por

ello el problema de simulación del creep no es más que un problema de ajuste. Existe dos métodos de ajuste: M.Clásicos y M.Modernos.

M.Clásicos: No modelan el periodo terciario pues consideran que es inestable y lleva a la rotura.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_t^c + \varepsilon_s^c \quad (5.12)$$

Donde el primer término es el transitorio y el segundo el permanente:

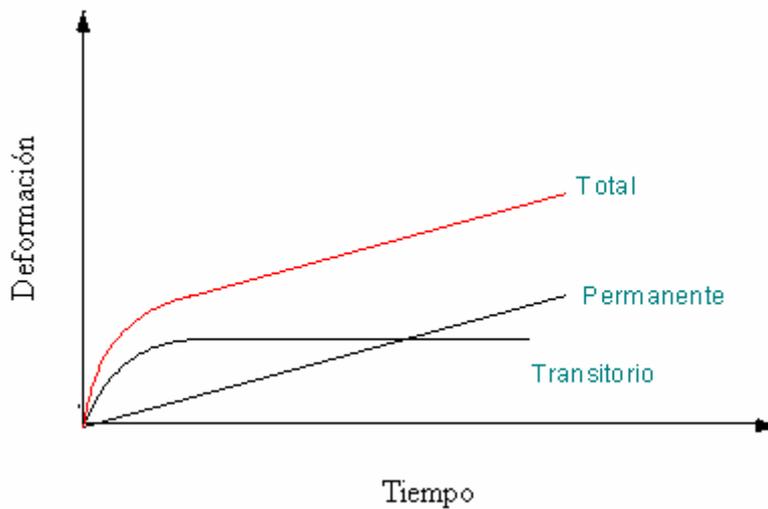


Fig. 5.3: Método clásico

Más concretamente:

$$\varepsilon^c(\sigma, T, t) = C_2 \cdot (\sigma^{C_3}) \cdot \left(e^{\frac{-C_4}{T}} \right) \left(1 - e^{-C_1 \cdot t} \right) + C_5 \cdot (\sigma^{C_6}) \cdot \left(e^{\frac{-C_7}{T}} \right) \cdot t \quad (5.13)$$

Donde experimentos revelan que las constantes C_6 y C_7 no son constantes y varían también con la temperatura y tensión.

M.Modernos: modelan todo el rango del ensayo de fluencia siendo el secundario la transición entre el primario y el terciario.

$$\varepsilon^c(\sigma, T, t) = \theta_1(\sigma, T) \cdot \left(1 - e^{-\theta_2(\sigma, T) \cdot t} \right) + \theta_3(\sigma, T) \cdot \left(e^{\theta_4(\sigma, T) \cdot t} - 1 \right) \quad (5.14)$$

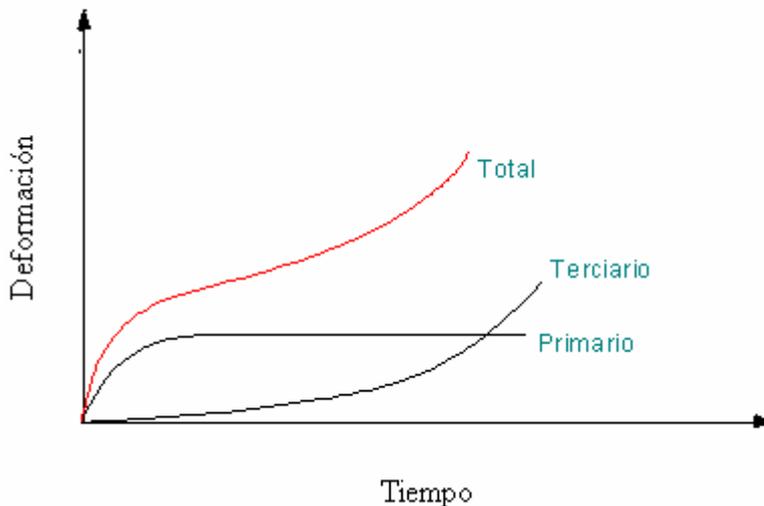


Fig. 5.4: Métodos modernos

5.1.2.5.3.2 Creep bajo tensiones variables.

Lo normal es que las tensiones no sean constantes sino variables. Para tener en cuenta esta variabilidad existen dos modelos. Uno llamado hipótesis de endurecimiento por tiempo y otro hipótesis de endurecimiento por deformación. Donde a partir del ensayo de fluencia y planteando una ecuación diferencial se puede obtener la deformación de creep para tensión variable. No obstante en la ingeniería civil la mayoría de los elementos estructurales soportan una carga permanente y una sobrecarga de manera que la carga total oscila entre la suma de las dos y la carga muerta. A efectos prácticos para creep se puede considerar que la carga del elemento es constante e igual a la suma de la carga permanente y un porcentaje de la sobrecarga asumiendo que es cuasi-permanente.

5.1.2.5.3.3 Estimación del tiempo de rotura

Elementos bajo una carga sostenida sensibles al creep pueden repentinamente fallar después de un largo periodo de tiempo. Sin embargo los ensayos de creep se realizan para cortos periodos de tiempo, por lo que es necesario un proceso de extrapolación de resultados obtenidos en estos ensayos a las condiciones reales. Lo habitual es ensayar estos elementos en condiciones de temperatura y tensiones superiores a las de servicio, lo cual dará tiempos de rotura admisibles y estimar el tiempo de rotura real.

Hay dos formas de proceder, por medio de los métodos clásicos y modernos.

Clásicos: se basan en la relación empírica entre el tiempo de rotura o tiempo resistente (t_r) y la velocidad de deformación del permanente.

$$M = t_r \cdot \left(\frac{d}{dt} \epsilon_s \right) \tag{5.15}$$

Donde M es un dato experimental.

Introduciendo el valor de la velocidad de deformación del permanente y tomando logaritmo.

$$C_6 \cdot \log(\sigma) = -\log(t_r) + \log\left(\frac{C_7}{\frac{M \cdot e}{C_5} T}\right) \quad (5.16)$$

Como se ve, existe una relación bilineal logarítmica entre el tiempo de rotura y la tensión y temperatura. No obstante es habitual que las constantes C_6 y C_7 sean dependiente también de la tensión y la temperatura lo que hace que realmente no exista esa linealidad.

M.Modernos: se dan cuenta de esa dependencia de las constantes respecto de la tensión y temperatura y buscan una función de aproximación de ellas.

De manera que encuentran:

$$\theta_i(\sigma, T) = e^{f_i(\sigma, T)} \quad f_i = f_{\text{lineal}}(\sigma, T) \quad (5.17)$$

Como se ve, estas funciones son lineales logarítmicamente dependiente de la tensión y la temperatura que metiéndolas en la función de ajuste de los métodos modernos tenemos en todo momento la deformación a lo largo del tiempo y por tanto la rotura.

5.1.2.5.3.4 Ensayos de creep en los FRP

Normalmente es admitido que el principal responsable del creep, en el FRP, es la matriz siendo la fibra mucho menos susceptible. Por ello, inicialmente se produce una deformación elástica del conjunto (donde las cargas se reparten debidamente entre la matriz y las fibras) seguido de una deformación viscosa de la matriz a causa del creep que intenta ser impedida por el vínculo con las fibras. De esta manera las cargas que soportaba la matriz se traslada progresivamente a las fibras incrementado la tensión y deformación de las mismas. Pero como al disminuir la carga en la matriz se vuelve menos sensible al creep este traslado de cargas se hace cada vez más lento y la deformación total del conjunto tiende de manera asintótica a la deformación que tendría si toda la carga se la llevara las fibras. [Hull, D. and Clyne, T.W. (1996)]

Resultados de un programa experimental sobre barras de 6 mm. de GFRP, AFRP y CFRP para intervalos de hasta 100h, indican que existe una linealidad logarítmica entre la tensión de rotura por creep y su tiempo resistente. Extrapolando linealmente los resultados para una vida de 500000h (57 años) se obtuvo que la tensión relativa de fallo respecto a la tensión límite inicial a corto periodo fuera de 0.29, 0.47 y 0.93 respectivamente. Resaltar que se está extrapolando linealmente como en los métodos clásicos pero realmente no es así existiendo una pequeña curvatura más acentuada con el tiempo. [fib Task Group 9.3]

Otras investigación fue realizada sobre barras comerciales de CFRP Y AFRP con matriz de epoxi fueron testada a temperatura ambiente. Como resultados se obtuvo que el porcentaje de resistencia respecto a la inicial retenido fue de 79% y 66% tras una estimación de 50 años respectivamente. Sin embargo para GFRP con viniléster resina fue encontrado un porcentaje retenido del 55%.

También se elaboraron informes sobre barras de AFRP y CFRP bajo diferentes condiciones ambientales obteniéndose que estas condiciones ambientales puedan afectar al desarrollo del creep.

En conclusión destacar que el creep es un fenómeno que afecta fuertemente a los FRP. Este fenómeno depende fundamentalmente de la tensión sostenida y de la temperatura siendo también afectados por el ambiente como la humedad, alcalinidad y soluciones ácidas. En general resaltar que lo CFRP son menos susceptibles al creep seguidos por AFRP y por último GFRP. Debido a la gran afección del creep en estos refuerzos las normativas tienden a tener en cuenta este fenómeno limitando la tensión de servicio.

5.1.2.5.4 Fatiga

La fatiga es un fenómeno de degradación de las propiedades del material al someterlo a cargas cíclicas incluso inferiores al límite elástico. El estudio de la fatiga para los componentes se hace por medio de ensayos obteniéndose curvas de tipo S-N donde muestran el rango de tensiones para el que se produce el fallo frente al número de ciclos necesario. Los factores más importantes que entran en juego son el rango de tensiones, la tensión media, así como las propiedades físicas y geométricas de la probeta a ensayar. En estas curvas es muy característica la presencia de un rango de tensiones para el que no se produce la rotura por fatiga, este valor no está claro para la mayoría de los FRP.

Existe una gran cantidad de datos a cerca de la fatiga para FRP. Sin embargo, la mayoría de esos datos son aplicados a la industria aeronáutica. Veamos algunas observaciones de la fatiga para los FRP de cara a la construcción. Resultados obtenidos [16] muestran que los CFRP son generalmente los menos propensos a fallo por fatiga. Si mostramos las curvas S-N se puede observar por termino medio que la perdida de resistencia y por tanto la pendiente negativa oscila entre 5 al 8% de la resistencia estática inicial por década logarítmica. Además en un millón de ciclos la resistencia restante es del 50 al 70% de la resistencia inicial siendo relativamente poco afectada por la temperatura y humedad a menos que la matriz presenta graves síntomas de deterioro.

Mientras que para los refuerzos de fibra de vidrio presentan una mayor sensibilidad a la fatiga siendo su pendiente superior y alrededor del 10% de perdida de resistencia respecto a la inicial por década logarítmica. El mecanismo de fatiga es debido principalmente por las interacciones fibra contra fibra dentro de la matriz. Resaltar que en este caso los factores ambientales juegan un papel fundamental en la fatiga debido a la susceptibilidad de la fibra de vidrio a la humedad, alcalinidad y soluciones ácidas. En refuerzos de AFRP el comportamiento a fatiga es similar a los anteriores donde la pendiente de las curvas S-N se sitúan entre el 5 y 6% de resistencia respecto a la inicial por década logarítmica. Siendo su resistencia después de 2 millones de ciclos del 54 al 73% de la inicial.

Por último cabe mencionar otras consideraciones adicionales que pueden acentuar la fatiga. Éstas son la presencia de rugosidades superficial en las barras que se practican para mejorar el vínculo con el hormigón y la presencia de dobleces en el refuerzo que pueden actuar como concentrador de tensiones. A efectos de diseño se suele limitar el rango de tensiones de manera que asegure la seguridad estructural para todo el ciclo

de vida.

5.1.3 Características

5.1.3.1 Introducción

Como se ha explicado anteriormente, los FRP tienen un comportamiento anisótropo donde la tracción es su principal forma de trabajo. Por tanto a efectos de diseño se considerará que su resistencia a compresión y cortante son nulas, siendo sus propiedades a tracción dadas por el fabricante. Estas son, resistencia última, módulo elástico, y deformación última hasta la rotura para cada una de las barras en las situaciones dadas por el fabricante. Estas características pueden ser dadas en forma de una distribución o por medio de su valor característico que corresponde al cuantil 5% de ser superado. De forma adicional se mostrarán sus propiedades a largo plazo debido a la gran influencia del creep en las propiedades mecánicas de las mismas y la temperatura de reblandecimiento.

5.1.3.2 Resistencia de cálculo del refuerzo

La resistencia de cálculo del refuerzo viene dada por la resistencia característica (correspondiente al cuantil 5% de la distribución probabilística) reducida por el factor de seguridad y el factor ambientales que afectan a las propiedades mecánicas de la misma. En el capítulo de durabilidad se mostraran el cálculo del factor reductor.

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\eta_{env} \cdot \gamma_m} \quad (5.18)$$

Donde:

f_{fk} = Resistencia característica

f_{fd} = Resistencia de cálculo

η_{env} = Factor reductor medioambiental

Equiparablemente, el valor de cálculo de la resistencia última a tracción definida por el código ACI, se determina por medio de la "guaranteed tensile strength" (f'_{fu} , equivale a la resistencia característica, y se define como la media de la resistencia obtenida en ensayos de caracterización de la fibra menos tres veces su desviación típica ($f'_{fu} = f_{u,ave} - 3\sigma$)) reducido por un factor ambiental. Donde el factor de seguridad es aplicado a la resistencia total del elemento (máximo flector resistente, máximo cortante resistente...) y no específicamente a la resistencia del material.

$$f_{fu} = C_E \cdot f'_{fu} \quad (5.19)$$

Donde:

C_E = Coeficiente reductor medioambiental.

5.1.3.3 Deformación última de cálculo

La deformación última de cálculo viene dada, igual que la resistencia última de cálculo, por su valor característico reducido por el factor de seguridad y factor ambiental. En el caso de desconocimiento de esta última se puede definir mediante la resistencia característica dividida por el módulo elástico dado por el fabricante (siendo éste su valor medio).

$$\varepsilon_{fuk} = \frac{f_{fk}}{E_f} \quad (5.20)$$

$$\varepsilon_{fu} = \frac{\varepsilon_{fuk}}{\eta_{env} \cdot \gamma_m} \quad (5.21)$$

Donde:

ε_{fk} = Deformación última característica

ε_{fu} = Deformación última de diseño

E_f = Módulo elástico

Mientras que la definición de la deformación última de cálculo especificada por el código ACI es totalmente similar. De manera que, la deformación de cálculo es hallada por medio de la “guaranteed rupture strain” (ε_{fu}^* , equivalente a la deformación característica) reducido por el factor medioambiental. Donde la “guaranteed rupture strain” puede ser determinada dividiendo la “guaranteed tensile strength” por su módulo elástico (definido este último por su valor medio).

$$\varepsilon'_{fu} = \frac{f'_{fu}}{E_f} \quad (5.22)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon'_{fu} \quad (5.23)$$

5.1.3.4 Diagrama tensión deformación de cálculo de los FRP

Para el cálculo de los refuerzos se asume que el comportamiento a tracción es lineal elástico hasta la rotura siendo este definido en el apartado anterior. Dicho diagrama se detalla a continuación.

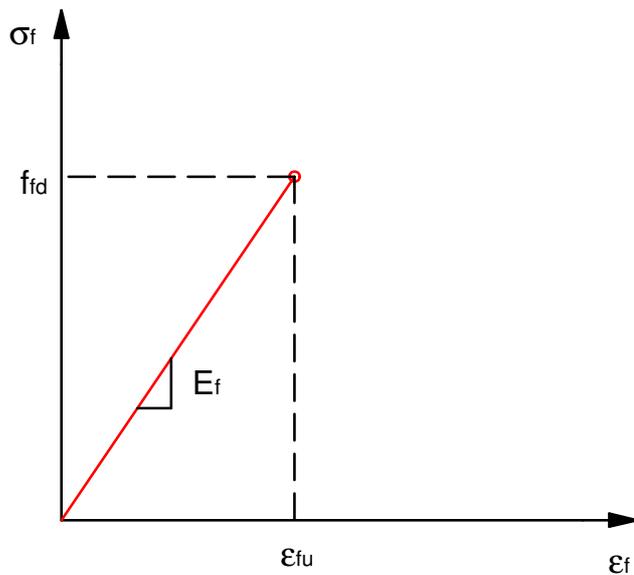


Fig. 5.5: Diagrama de tensión deformación del FRP

5.2 CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN

5.2.1 Tipificación de los hormigones

Antes que nada es necesario clasificar los tipos de hormigones respecto a una serie de cualidades que lo definen. En base a la normativa española [8], su tipificación vendrá dada por la siguiente nomenclatura:

T-R/C/TM/A

Donde:

T = Indicativo que será HM en el caso de hormigón en masa, HA en el caso de hormigón armado y HP en el de pretensado.

R = Resistencia característica especificada en MPa (20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100)

C = Indicativo del tipo de consistencia: S = Seca; P = Plástica; B = Blanda; F = Fluida; L = Líquida.

TM = Tamaño máximo del árido en mm.

A = Designación del ambiente.

- La importancia de determinar el tamaño máximo del árido radica en la necesidad de asegurar que el hormigón pasará, con razonable facilidad, entre las armaduras, o entre éstas y los encofrados, y rellenará adecuadamente el volumen del elemento.
- Desde el punto de vista de la consistencia, se debe garantizar que, considerada la forma de la pieza, la disposición de las armaduras y teniendo en cuenta los medios de compactación disponibles, el hormigón podrá rellenar

eficazmente el volumen de la pieza sin prestar un exceso de agua que reduciría su resistencia y durabilidad.

- Es obvio que la resistencia es un parámetro fundamental para el diseño no obstante, su valor es algo ambiguo pues depende de muchos factores como la edad de evaluación, condiciones ambientales... Como se detallará a continuación y en base a la EHE, se entiende por resistencia el valor con una probabilidad del 95% de ser superado por los ensayos normalizados pertinentes.

5.2.2 Resistencia a compresión del hormigón

La resistencia a compresión del hormigón depende de la composición que lo forma (relación agua/cemento, tipo de cemento, tamaño y tipo de árido, porcentaje de aire o poros disueltos...) y del tiempo y calidad del curado. Actualmente la resistencia comercial con la que se trabaja es entorno a 25-50 MPa, existiendo hormigones de alta resistencia que logran llegar hasta 100MPa. Este tipo de hormigones se consigue modificando (cementos de alta dureza, tamaño de áridos menores, menores ratio agua/cemento) y añadiendo una serie de componentes respecto a los hormigones normales, como humo de sílice, superplastificantes (ayudan a una mejor trabajabilidad debido al poco agua), etc. La importancia del uso de este tipo de hormigones juntos a los refuerzos de FRP reside en las mejores prestaciones que ambos presentan, de manera que se logra aprovechar en mejor medida las cualidades de cada uno de ellos datando al elemento de una excelente resistencia.

A efectos de este proyecto (y de la normativa EHE) se entiende como resistencia del hormigón a compresión los resultados obtenidos de ensayos de rotura a compresión a 28 días, realizados sobre probetas cilíndricas de 15 cm. de diámetro y 30 cm. de altura, conservadas y ensayadas conformen a la normativa vigente. Así pues, se denomina como resistencia característica a compresión de proyecto (f_{ck}) el valor de la resistencia que no es superado por el 5% de todos los posibles resultados de ensayos normalizados sobre un determinado hormigón. Este valor es el que se toma como valor base para diseñar la estructura siendo también nombrado como resistencia característica especificada. No obstante, cabe apreciar que el hormigón puesto en obra puede tener una resistencia característica (cuantil 5% de la distribución real) diferente al proyectado, debiendo ser la real ($f_{c \text{ real}}$) al menos igual o superior al valor proyectado. Para ello es necesario controlar y estimar este valor característico por medio de una serie finita de ensayos sobre el hormigón puesto en obra de manera que, el cuantil 5% de la distribución obtenida correspondiente al valor característico real estimado ($f_{c \text{ est}}$), certifique que es correcto.

Análogamente, el código ACI define como resistencia a compresión del hormigón, el valor obtenido en base a resultados de ensayos a rotura sobre probetas cilíndricas de 6 in. x 12 in. (15cm. x 30 cm.) curadas condiciones de laboratorio y testadas a 28 días de edad según la norma ASTM-39. Igualmente define una resistencia específica (Specified strength f'_c , equivalente a la resistencia característica) como valor base o de diseño. Este valor no corresponde con el valor promedio de la resistencia de un determinado hormigón, sino a un valor inferior a éste restándole una proporción de su desviación dependiendo de la calidad exigida. Además, acepta que la resistencia real del hormigón en obra sea diferente a la especificada, de tal manera que la media de los resultados obtenidos de ensayos sobre el hormigón dispuesto, supere en más de una cierta cantidad estipulada a la resistencia específica (f'_c).

5.2.3 Resistencia a tracción

El término de resistencia a tracción del hormigón se refiere a la máxima tensión que el hormigón puede soportar cuando está sometido a tracción uniaxial.

Si la resistencia a tracción es medida por medio de la resistencia a rotura en tracción indirecta ($f_{ct,sp}$) o como resistencia a flexotracción ($f_{ct,fl}$), la resistencia a tracción axial ($f_{ct,ax}$) puede deducirse aproximadamente de estos valores tomando:

$$f_{ct,ax} = 0.9 \cdot f_{ct,sp} \quad (5.24)$$

$$f_{ct,ax} = 0.5 \cdot f_{ct,fl} \quad (5.25)$$

Si no se dispone de resultado de ensayos se admite que la resistencia media a tracción ($f_{ct,m}$) puede ser estimada por medio de la resistencia característica a compresión de la siguiente forma:

$$f_{ct,m} = 0.3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad \text{Para } f_{ck} \leq 50\text{MPa} \quad (5.26)$$

$$f_{ct,m} = 0.58 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Para } f_{ck} > 50\text{MPa}$$

*(f_{ck} en MPa)

Donde la resistencia característica a tracción inferior (cuantil 5% de la distribución) y superior (cuantil 95%) puede deducirse tal como respectivamente se muestra:

$$f_{ct,k0.05} = f_{ct,m} \cdot 0.7 \quad (5.27)$$

$$f_{ct,k0.95} = f_{ct,m} \cdot 1.3 \quad (5.28)$$

Además la resistencia media a flexotracción puede ser estimada como sigue, la cual es función del canto total del elemento h (mm.):

$$f_{ct,m,fl} = \max \left[\left(1.6 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{ct,m} \cdot f_{ct,m} \right] \quad (5.29)$$

El código ACI procede de manera similar tanto que supone que la resistencia a tracción axial (f_{ct}) es muy pobre en el hormigón, aproximando su valor comprendido entre $0.1f_{ck} < f_{ct} < 0.2f_{ck}$. Además estima la resistencia a flexotracción (f_r , equivalente a $f_{ct,fl}$) mediante la formula:

$$\begin{aligned} f_r &= 0.62 \cdot \sqrt{f'_c} & \text{para } f'_c < 41.4\text{MPa} \\ f_r &= 1 \cdot \sqrt{f'_c} & \text{para } f'_c \geq 41.4\text{MPa} \end{aligned} \quad (5.30)$$

5.2.4 Resistencia de cálculo

Se concreta como resistencia de cálculo a compresión del hormigón, la obtenida de su valor característico de proyecto reducido por el factor de seguridad parcial del material y por un factor que informa sobre el cansancio del hormigón. Esto es:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (5.31)$$

Donde

α_{cc} = Factor que tiene en cuenta el cansancio del hormigón cuando está sometido a altos niveles de compresión. Normalmente este factor será igual a la unidad a menos que el proyectista considere oportuno su modificación.

De igual manera, se toma como resistencia de cálculo a tracción la obtenida como sigue:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ct.k}}{\gamma_c} \quad (5.32)$$

Donde

α_{ct} = Factor que tiene en cuenta el cansancio del hormigón cuando está sometido a altos niveles de tracción. Normalmente este factor será igual a la unidad a menos que el proyectista considere oportuno su modificación

Es importante recordar en este apartado que el código ACI aplica el coeficiente de seguridad a la capacidad resistente total y no a las variables particulares de cálculo. No obstante aplica un factor de 0.85 que afecta a la resistencia del hormigón para tener en cuenta el cansancio del hormigón.

5.2.5 Diagrama tensión deformación de cálculo

El diagrama tensión-deformación del hormigón depende de muchas variables: edad del hormigón, duración de la carga, forma y tipo de la sección, tipo de árido, etc. Debido a la variabilidad que presenta para cada hormigón particular y a su morfología, es factible utilizar para el cálculo diagramas simplificados tal y como los expuestos seguidamente:

5.2.5.1 Diagrama parábola rectángulo

Esta formado por una parábola de grado n cuyo vértice se encuentra en la abscisa ϵ_{c0} (deformación de rotura a compresión simple) y ordenada f_{cd} (tensión a compresión máxima del hormigón), seguido por una recta horizontal de abscisa máxima ϵ_{cu} (Deformación última del hormigón a flexión).

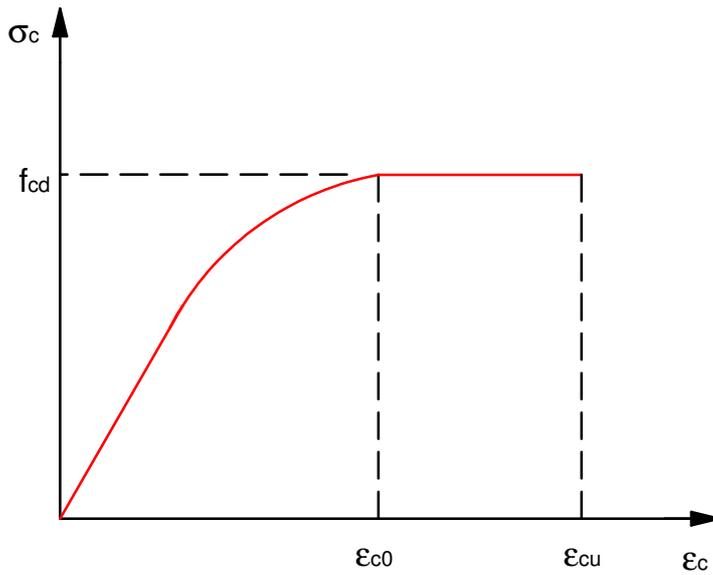


Fig. 5.6: diagrama parábola rectangular del hormigón

Las ecuaciones que los definen son:

$$\sigma_c = f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^n \right] \quad \text{para } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c0}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{para } \epsilon_{c0} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$$

(5.33)

Donde:

Deformación de rotura a compresión simple:

$$\epsilon_{c0} = 0.002 \quad \text{para } f_{ck} \leq 50\text{MPa}$$

$$\epsilon_{c0} = 0.002 + 0.000085 \cdot (f_{ck} - 50)^{0.5} \quad \text{para } f_{ck} > 50\text{MPa}$$

(5.34)

Deformación última a compresión:

$$\epsilon_{cu} = 0.0035 \quad \text{para } f_{ck} \leq 50\text{MPa}$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0026 + 0.0144 \cdot \left(\frac{100 - f_{ck}}{100} \right)^4 \quad \text{para } f_{ck} > 50\text{MPa}$$

(5.35)

Grado del exponente de la parábola:

$$n = 2 \quad \text{para } f_{ck} \leq 50\text{MPa}$$

$$n = 1.4 + 9.6 \cdot \left[\left(\frac{100 - f_{ck}}{100} \right)^4 \right] \quad \text{para } f_{ck} > 50\text{MPa} \quad (5.36)$$

*(f_{ck} en MPa)

El código ACI[2] propone básicamente el mismo diagrama parábola-rectangular del hormigón, con la salvedad que la cota superior de tensión la limita a $0.85f'_c$. A continuación se expone su formulación

$$f_c = 0.85f'_c \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad \text{para } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (5.37)$$

$$f_c = f'_c \quad \text{para } \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$$

Donde:

Deformación de rotura a compresión simple o deformación para la que se desarrolla la máxima capacidad de compresión del hormigón:

$$\epsilon_0 = 2 \cdot \frac{0.85 \cdot f'_c}{E_c} \quad (5.38)$$

Deformación última a compresión

$$\epsilon_{cu} = 0.003 \quad (5.39)$$

Nota: El código ACI tiene en cuenta que la deformación última varía en función de la resistencia a compresión del hormigón. No obstante, toma un valor conservativo de la misma constante e igual a 0.003. A efectos de cálculo este valor conservativo puede dar lugar a pequeñas diferencias respecto a códigos que toman valores menos conservativos (Este es el caso de la EHE que toma el valor de 0.0035)

5.2.5.2 Diagrama rectangular

Como su palabra dice, está formado por un rectángulo de profundidad $\lambda(x) \cdot h$ y eficacia o tensión media $\eta(x) \cdot f_{cd}$, donde sendos factores dependen de la resistencia del hormigón así como la profundidad de la fibra neutra. No obstante, este diagrama no nos informa sobre el comportamiento del hormigón, por ello, más que un diagrama, es una simplificación práctica matemática del diagrama tensión-deformación en el que el centro de gravedad y área que encierra coinciden.

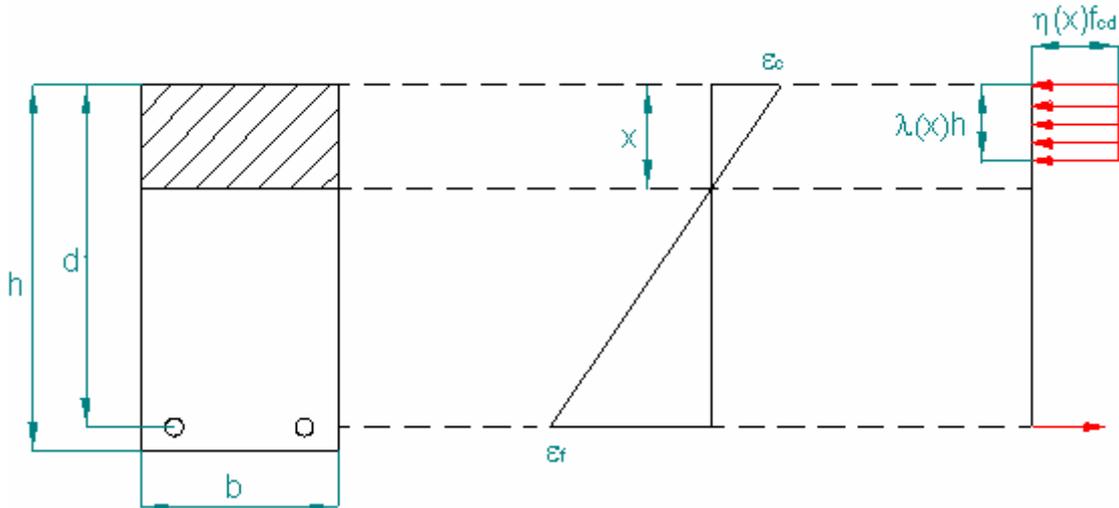


Fig 5.7: Diagrama rectangular del hormigón según EHE

Eficacia:

$$\eta(x) = \eta \quad \text{para } 0 \leq x \leq h \quad (5.40)$$

$$\eta(x) = 1 - (1 - \eta) \cdot \frac{h}{x} \quad \text{para } h < x < \infty \quad (5.41)$$

Profundidad:

$$\lambda(x) = \lambda \cdot \frac{x}{h} \quad \text{para } 0 \leq x \leq h \quad (5.42)$$

$$\lambda(x) = 1 - (1 - \lambda) \cdot \frac{x}{h} \quad \text{para } h < x < \infty \quad (5.43)$$

Donde:

$$\eta = 1 \quad \text{para } f_{ck} \leq 50 \text{MPa} \quad (5.44)$$

$$\eta = 1 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \quad \text{para } f_{ck} > 50 \text{MPa}$$

$$\lambda = 0.8 \quad \text{para } f_{ck} \leq 50 \text{MPa} \quad (5.45)$$

$$\lambda = 0.8 - \frac{f_{ck} - 50}{400} \quad \text{para } f_{ck} > 50 \text{MPa}$$

*(f_{ck} en MPa)

Debido al gran tiempo que consume evaluar el área (hablando bidimensionalmente) bajo la curva de compresión del elemento, el código ACI también acude a este tipo de simplificación matemática, llamada equivalente rectangular block, para calcular la

compresión total y centro de gravedad de la misma. Este rectángulo equivalente se define por una profundidad a ($a = \beta_1 \cdot c$), que depende de la fibra neutra, y una eficacia o tensión media $0.85f'_c$. Esquemáticamente queda:

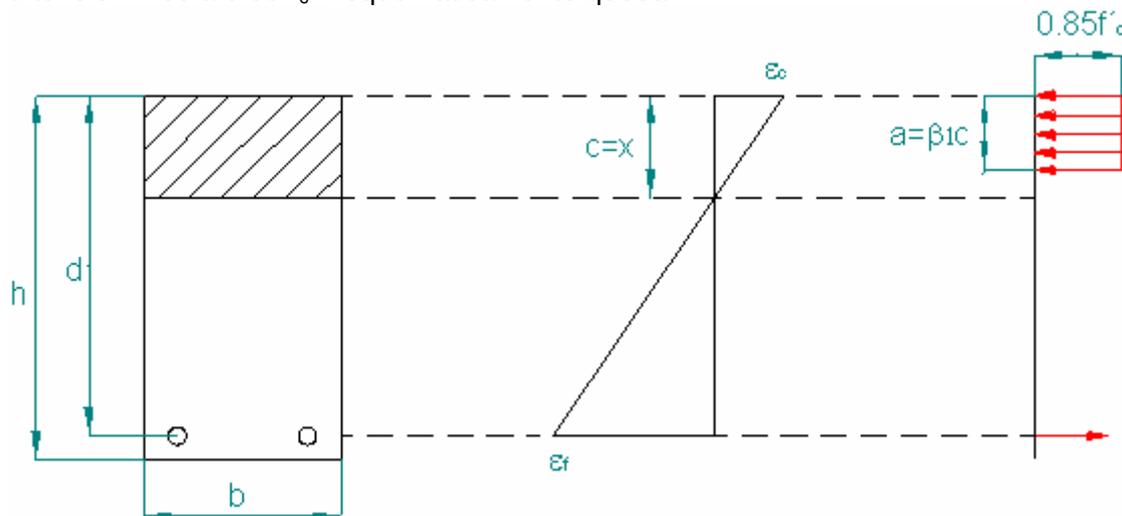


Fig 5.8: Diagrama rectangular del hormigón según ACI

Donde:

$$\text{Tensión media} = 0.85 \cdot f'_c$$

$$\text{Profundidad} = a = \beta_1 \cdot c$$

Siendo:

$$\beta_1 = 0.85 \quad \text{para } 17.24\text{MPa} < f'_c \leq 27.7\text{MPa}$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \cdot \left(\frac{f'_c - 27.6}{6.9} \right) \quad \text{para } 27.6\text{MPa} < f'_c \leq 55.1\text{MPa} \quad (5.46)$$

$$\beta_1 = 0.65 \quad \text{para } f'_c > 55.1\text{MPa}$$

5.2.6 Módulo de deformación longitudinal

Como es lógico, debido a la gran cantidad de variables que definen el comportamiento del hormigón y a la no linealidad que presenta, es difícil definir un módulo de deformación longitudinal único. Por ello dependiendo del uso al que este destinado se definen los siguientes:

a) Módulo longitudinal secante: Pendiente secante de la curva tenso-deformacional real a la edad de 28 días que la corta a una tensión de $0.4f_{cm}$. Es valida siempre que las tensiones, en condiciones de servicio, no sobrepasen dicho valor.

$$E_{cm} = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}}$$

Donde f_{cm} es la resistencia media del hormigón a 28 días en MPa. Ésta puede

estimarse a través de la resistencia característica a la edad de 28 días tal que:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (5.47)$$

b) Módulo de deformación longitudinal inicial: Pendiente tangente a la curva en el origen a la edad de 28 días. Para cargas instantáneas o rápidamente variables. Su aplicación es para el cálculo de la deformación en casos de alta velocidad de aplicación de la carga y en las deformaciones por fluencia.

$$E_c = \beta_E \cdot E_{cm} \quad (5.48)$$

$$\beta_E = 1.3 - \frac{f_{ck}}{400} \quad \text{Siendo } \beta_E \leq 1.175 \quad (5.49)$$

Si se quiere obtener el módulo de deformación a edades diferentes a 28 días, basta con aplicar la siguiente fórmula en función de la resistencia a compresión media en dependiente del tiempo:

$$E_{cm,j} = \left(\frac{f_{cm,j}}{f_{cm}} \right)^{0.3} \cdot E_{cm} \quad (5.50)$$

$$E_{c,j} = \beta_E \cdot E_{cm,j} \quad (5.51)$$

Donde

$E_{cm,j}$ = Módulo de deformación secante a la edad de j días

$E_{c,j}$ = Módulo de deformación inicial a la edad de j días

$f_{cm,j}$ = Resistencia media a compresión a la edad de j días

*(f_{ck} en MPa)

El código ACI también se da cuenta de la dificultad de definir un único módulo elástico. Por ello igualmente diferencia entre módulo inicial, que es la tangente en el origen de la curva de comportamiento, y módulo secante (E_c , equivalente a E_{cm}) que corta a la curva en una tensión $0.45f'_c$.

$$E_c = 4750 \sqrt{f'_c} \quad \text{para } f'_c < 41.4 \text{ MPa} \quad (5.52)$$

$$E_c = \left(3333 \cdot \sqrt{f'_c} + 6895 \text{ MPa} \right) \cdot \left(\frac{w_c}{2320} \right)^{1.5} \quad \text{para } f'_c \geq 41.4 \text{ MPa} \quad (5.53)$$

Donde:

w_c = Peso específico del hormigón (kg/m^3)

5.2.7 Retracción y fluencia

Estos fenómenos, tal como se verá más adelante, tiene gran relevancia en el cómputo de la flecha diferida.

La retracción del hormigón depende fundamentalmente de la humedad ambiental, las dimensiones del elemento, la composición del hormigón y el tiempo transcurrido desde la ejecución. La retracción total está formada por la retracción de secado y la autógena. Esta última se desarrolla durante el endurecimiento del hormigón, mientras que la de secado se desarrolla lentamente.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca} \quad (5.54)$$

Donde:

t = Edad del hormigón en el instante de evaluación, en días

t_s = Edad del hormigón al comienzo de la retracción, en días.

ε_{cd} = Deformación de retracción por secado

ε_{ca} = Deformación de retracción autógena

Mientras que la fluencia es un efecto debido a cargas de larga duración. La deformación dependiendo de la tensión en el instante t, para una tensión constante σ(t₀) menor de 0.45f_{cm} aplicada en t₀, puede estimarse como sigue:

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \sigma(t_0) \cdot \left(\frac{1}{E_{c,t_0}} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c,28}} \right) \quad (5.55)$$

El primer término → deformación instantánea

El segundo término → deformación fluencia

Donde:

t = Edad del hormigón en el instante de evaluación, en días.

t₀ = Instante de aplicación de la carga por primera vez, en días.

φ(t, t₀) = Coeficiente de fluencia

5.2.8 Coeficiente de Poisson

A efectos de cálculo, el coeficiente de Poisson para deformaciones elásticas puede tomarse igual a 0.2

Si se permite la figuración del hormigón traccionado el coeficiente de Poisson puede considerarse nulo.

5.2.9 Coeficiente de dilatación térmica

Se tomará como coeficiente de dilatación térmica 10·10⁻⁶