

6 CAPÍTULO**DURABILIDAD****ÍNDICE**

6	CAPÍTULO: DURABILIDAD	58
6.1	INTRODUCCIÓN	58
6.2	DURABILIDAD DEL FRP COMO REFUERZO INTERNO	58
6.2.1	<i>Efecto del agua</i>	59
6.2.2	<i>Efectos de los cloruros</i>	60
6.2.3	<i>Efectos de la alcalinidad</i>	60
6.2.3.1	Conclusiones.....	62
6.2.4	<i>Radiación ultravioleta</i>	62
6.2.5	<i>Carbonatación</i>	63
6.2.6	<i>Ataques ácidos</i>	63
6.2.7	<i>Efectos de la tensión a largo plazo.</i>	63
6.2.8	<i>Efectos de la temperatura</i>	63
6.3	DISEÑO PARA LA DURABILIDAD	63
6.3.1	<i>Introducción</i>	63
6.3.2	<i>Cálculo del valor de diseño de la resistencia a tracción según modelo más preciso</i> 65	
6.3.2.1	Factor reductor ambiental (η_{env})	66
6.3.2.1.1	Término de humedad (η_h)	67
6.3.2.1.2	Término de la temperatura (η_T).....	68
6.3.2.1.3	Término del tiempo de vida de diseño (η_d).....	68
6.3.2.1.4	Término corrector del diámetro (η_d)	68
6.3.2.2	Factor reductor del material γ_m	69
6.3.2.3	Ejemplos.....	69
6.4	CONCLUSIONES	70

6 CAPÍTULO: DURABILIDAD

6.1 Introducción

En esta sección se discute el ambiente del hormigón y sus efectos sobre los refuerzos de FRP en términos de internas o externas condiciones ambientales que pueden afectar a su durabilidad. Las específicas condiciones estudiadas son: el efecto de la humedad, los cloruros, alcalinidad, tensión, temperatura, carbonatación y ácido. [fib Task Group 9.3]

Normalmente la durabilidad de los refuerzos en el hormigón serán medidos predominantemente por medio de acelerados métodos que exponga a los especímenes a más duras condiciones que las de servicio para posteriormente extrapolarlo a las condiciones reales. Esta medida de la durabilidad normalmente hará referencia a los cambios de las propiedades mecánicas como resistencia, módulo, y unión con el hormigón.

Para empezar, describamos a priori el ambiente del hormigón y los efectos sobre las armaduras de acero. El hormigón contiene hidróxidos sódicos, potásicos y cálcicos que hacen que el pH del entorno sea alrededor de 13 promoviendo un ambiente básico. Esta alta alcalinidad causa la formación de una capa pasiva de óxido que previene y protege a la armadura de ataques directos del oxígeno y agua consiguiendo una inhibición de la corrosión. Sin embargo los mecanismo más comunes de despasivación son: la carbonatación, la penetración de iones cloruro y ácido sulfúrico. La carbonatación es el más común problema de la armaduras donde el CO_2 reacciona con la cal libre de manera que tiende a modificar el pH haciéndolo ácido y despasivando al acero. Esto conlleva a la aceleración de la corrosión de la armadura por el O_2 y agua del ambiente que lo rodea que provoca un aumento del volumen de la misma deteriorando el hormigón circundante. Mientras que los ataques de iones cloruros se dan en lugares donde hay un gran aporte de ellos como en ambientes marinos, piscinas, puentes, etc.

Los factores que afectan a la durabilidad de los FRP son diferentes de los del acero tanto que parece no ser significativamente afectados por ataques de cloruros o por la carbonatación. Consiguientemente se estudiará los factores que afectan a la durabilidad de éstos.

6.2 Durabilidad del FRP como refuerzo interno

Para empezar hay tres componentes dentro del composite que puede afectar a la durabilidad:

- Matriz
- Fibras
- Unión matriz-fibra

Cada uno de estos elementos es susceptible a ataques de diferentes factores ambientales donde hay que asegurar que continúan ejerciendo su función durante toda la vida de diseño. Normalmente la matriz tiene la función de proteger a las fibras de las condiciones exteriores, siendo por tanto una barrera entre el ambiente y las fibras. Los factores externos que pueden influir sobre la protección son:

- Naturaleza del ambiente
- Tensión en el material
- Temperatura
- Condiciones del material (cortes de terminación o daños)
- Calidad del material

La efectividad de la matriz depende de la continuidad de la misma. Así pues en los corte de terminación de barras pueden quedar expuestas las fibras y por tanto un punto crítico desde el punto de la durabilidad. En esta zona el medio que lo rodeo puede atacar a la fibra y a la unión de fibra-matriz propagándose a lo largo de la barra perjudicando seriamente su durabilidad. Para evitar esto hay que sellar esta región para no permitir penetraciones de agentes dañinos.

En cuanto a la calidad del composite depende de varios factores:

- Envoltura de la resina (capacidad de la resina para embeber y proteger a la fibra adecuadamente)
- Ausencia de grietas en la matriz
- Ausencia de huecos (mejor cuanto más pequeños y distribuidos)
- Grado de curado de la resina
- Fuerte unión de fibra-matriz (puede ocurrir que una mala elección de ambos no sean totalmente compatibles y el vínculo de unión no sea el deseado)

Por ello, para asegurarse una óptima durabilidad del composite es necesario elegir la matriz más conveniente. Veamos pues las necesidades que deben cumplir:

- Inherente resistencia a ambientes alcalinos y ataques de cloruro
- Suficientemente resistente para evitar micro-grietas
- Suficientemente impermeable a agentes ambientales dañinos.
- Fácilmente procesable para asegura una buena calidad del composite
- Compatible con las fibras para poseer una fuerte unión fibra-matriz

A continuación vamos a estudiar los posibles efectos del ambiente sobre los FRP así como de la temperatura y la tensión.

6.2.1 Efecto del agua

El efecto del agua a sido estudiado para diferentes humedades y temperaturas incluso sumergiéndolas en ella. Estos estudios indican que el deterioro de la matriz puede ocurrir por actuación de las moléculas de agua sobre el polímero rompiendo las fuerzas de unión. Este hecho puede afectar a la resistencia de la matriz así como a su módulo y fragilidad pudiendo aparecer en éstas micro-grietas y pérdida de fuerza de unión con las fibras comprometiendo la durabilidad. Además a altas temperaturas pueden verse incrementado la difusión a través de la matriz y absorción de humedad por las fibras lo que disminuye sus propiedades. Sin embargo, algunos informes indican que algunos FRP vieron mejorados sus propiedades en el agua. Como

conclusión decir que el agua no es un agente crítico que afecta a la durabilidad de las mismas no obstante hay que tenerlo en cuenta respecto a pequeñas pérdidas de propiedades.

6.2.2 Efectos de los cloruros

La principal ventaja sobre el acero es la posible aplicación de los FRP sobre ambientes salinos. Se han hecho muchas pruebas a los FRP expuestos a diferentes concentraciones de cloruro así como humedad, temperatura y tensión. Como resultados de esta amplia variabilidad, diferencias entre ataque de cloruros, degradación debido a la difusión de humedad y ataques alcalinos sobre la fibras son difíciles de separar. En términos generales las barras de CFRP expuestas a ataques combinado humedad/cloruro en el hormigón muestran una pequeña degradación con el tiempo. Sin embargo sobre aramida y vidrio presentan mayor pérdida de sus propiedades.

Es necesario resaltar que el deterioro del FRP no ocurre sólo por acción del ataque de cloruros sino más bien debido a ataques alcalinos y una degradación de la resina debido a la acción del agua. Como conclusión, los posibles ataques de cloruros hay que estudiarlos conjuntamente con los efectos del agua y alcalinidad.

6.2.3 Efectos de la alcalinidad

Aunque el hormigón y su ambiente alcalino tradicionalmente han protegido a los refuerzos de acero, en los FRP no se puede decir lo mismo. Para estudiar la influencia de ello se han elaborado muchas investigaciones sobre el cambio de sus propiedades bien embebiendo de manera directa los refuerzos de FRP en el hormigón o bien sometiéndolo a un ambiente simulado alcalino compuesto por soluciones de hidróxido de sodio, potasio y calcio con un pH entorno a 13. Es importante notar que estos ambientes simulados son mucho más agresivos que el propio hormigón debido al incremento de movilidad de los iones OH. Por lo tanto no debería ser interpretado una equivalente relación entre las propiedades tras un determinado periodo de exposición en un ambiente simulado y las propiedades reales tras la acción del hormigón. No obstante, es muy común que los ensayos se realicen en condiciones simuladas incluso elevando la temperatura para poder acelerar estos efectos.

Como resultado general de los informes, se puede computar que los principales factores que influyen en la resistencia a la alcalinidad son:

- Susceptibilidad de las fibras a ataques alcalinos
- Difusión alcalina en la resina y por tanto nivel de protección de las fibras
- Calidad del composite para impedir la penetración de agentes alcalinos
- Temperatura que afecta a la reacción y a la difusión
- Concentración de alcalinidad que depende del tipo de hormigón.
- Movilidad de los iones OH
- Y el más importante, el tiempo.

Si nos centramos en la fibra en cuestión, de la multitud de datos referentes a la gran variedad de procesos de fabricación y de test practicados, se concluye que las fibras de vidrio son bastante más sensibles a ataques alcalinos seguidos por la fibra de

aramida y por último por la de carbono siendo ésta muy poco sensible. Mientras que si hablamos de matriz la más resistente es la viniléster siendo su difusividad menor que la del poliéster.

Véase una tabla significativa de resultados sobre la pérdida de resistencia de los diferentes FRP sometido a diversos ambientes alcalinos, temperatura y tensión obtenida del fib Task Group 9.3 [16]:

Tabla 6.1: Pérdida de resistencia en barras tensionadas y no tensionadas en ambiente alcalino								
Autor	Material	Resina	pH	Amb	Tª °C	Duración	Nivel de tensión	Pérdida de tensión
Tannous et al. (1998)	AFRP		12	Sat. Ca (OH) ₂	60	1a		6,4%
	AFRP				25			4,3%
	CFRP				60			0%
	CFRP				25			0%
	CFRP				60			0%
	CFRP				25			0%
Porter (1997)	GFRP		12,5-13		60	3m		55%
	GFRP							73%
	CFRP							0%
Uomoto (1997)	GFRP			NaOH	40	4m		
	AFRP							
	AGFRP							
Allmusallam Al-Salloum (2005)	GFRP	VE	>13	Mortero cem. 1%Na ₂ O en agua marina	40	4m	0	2,1%
						8m	0	15,6%
						16m	0	19,7%
						4m	20-25%	29,4%
						8m	20-25%	39%
16m	20-25%	47,9%						
Alsayed Alhozaimy (1998)	GFRP	VE+UP		Mortero cem. 20 g/l NaOH	Ext	4m		20%
	GFRP							0%
	GFRP							30%
	GFRP							0%
Micelli, Myers, Nanni (2001)	GFRP		12,6	0,16% Ca(OH) ₂ + 1%NaOH + 1,4%KO H	60	21d		0%
	GFRP					42d		0%
	GFRP					21d		30%
	GFRP					42d		41%
	CFRP					21d		1%
	CFRP					42d		8%
	CFRP					21d		0%
	CFRP					42d		0%
Benmokrane et al. (2005)	GFRP	VE:d= 9,5 mm	12,8	ACI	64	2m	19-29%	12%
	GFRP	9,5 mm			20	14m		15%
	GFRP	12,7 mm			57	4m		17%

	GFRP	16 mm			55	1m		2%
	GFRP	16 mm			61	2m		16%
Rahman (1998)	GFRP	VE		58 g/l NaOH	70	45d	30%	70%
	CFRP		370d			50%		
Arockiasamy et al. (1998)	CFRP		13-14			9m	65%	0%
Scheibe Rostasy	AFRP			Air 0,4 m KOH	20	3308h	75%	25%
	AFRP					714h		
Weber (2004)	GFRP	VE	13,7	Sat. Ca(OH) ₂ NaOH KOH	60	2000h	20%	<5%
	GFRP						25%	
	GFRP						30%	

En la siguiente tabla se muestra el efecto de los diferentes ambientes sobre una barra de GFRP:

Condiciones de exposición	Temperatura °C	% Resistencia original a tracción				
		Período del test en días				
		28	90	180	365	545
Alcalino	60	82	55	37	32	31
Hormigón	60	91	80	57	51	45
Agua	60	93	84	75	73	72
Todo (promed.)	20	95	92	90	88	80

En ella se puede observar que en orden de agresividad decreciente el que más le afecta es la alcalinidad a 60°C seguido por el hormigón a 60°C y por último el agua a 60°C. Sin embargo todas estas condiciones actuando juntas pero a una temperatura baja afecta aún mucho menos. Es decir la temperatura es un intensificador de los demás agentes.

6.2.3.1 Conclusiones

Es evidente el gran deterioro que sufre los GFRP tras la exposición a soluciones alcalinas. Sin embargo en barras embebidas en el hormigón con buena unión matriz fibra el deterioro es mucho menor siendo éste incrementado con la temperatura y el nivel de tensión

Los efectos de la alcalinidad sobre los AFRP son menores que en los GFRP pero a altas tensiones el daño es bastante considerable.

A penas se percibe problemas de alcalinidad sobre CFRP

Las matrices de vinil ester son mucho más alcalino resistentes que los poliésteres.

6.2.4 Radiación ultravioleta

Los rayos UV pueden afectar a las propiedades de los FRP siendo menos notorio en los CFRP. No obstante, teniendo en cuenta que las barras son rodeadas por el hormigón, este efecto no causa problemas a los refuerzos a no ser que se dispongan exteriormente en los que habría que protegerlos por medio de pinturas y barnices que actúen como filtro. Mencionar además que en la puesta en obra, traslado y

almacenamiento hay que prestar atención para que esté el menor tiempo posible bajo la acción directa del sol.

6.2.5 Carbonatación

La carbonatación no es un problema para los FRP por el hecho que baja el pH del hormigón y por tanto disminuyes los efectos perjudiciales de la alcalinidad. Tanto es así que prolonga la vida de servicio de los mismos.

6.2.6 Ataques ácidos

Hay muy poca información publicada sobre este hecho aunque es claro que puede afectar a las propiedades de los FRP pero en menor medida que en el acero. Por ello, una de las posibles aplicaciones sería en la industria a través de la combinación con cementos ácido-resistentes de alto contenido en alúmina.

6.2.7 Efectos de la tensión a largo plazo.

Este hecho afecta claramente a las propiedades y por tanto a la durabilidad de los FRP. No obstante, se puede considerar que ya fue ampliamente comentado en el creep. Sólo cabe volver a resaltar que cuanto mayor es la tensión mantenida menor es la durabilidad esperada.

6.2.8 Efectos de la temperatura

Como ya se ha comentado anteriormente la temperatura juega un papel fundamental en los FRP, de manera que, es recomendable que no se utilice bajo elevadas temperaturas. La principal causa de la gran sensibilidad a este parámetro es porque presentan una temperatura de reblandecimiento en la que la matriz se vuelve viscosa y deja de desarrollar su función de transmitir y repartir tensiones a la fibra. De esta manera se registran grandes deformaciones y pérdidas de sus propiedades mecánicas. Este fenómeno unido a la aceleración que provoca sobre los demás agentes hace que la temperatura sea un factor crítico de diseño.

6.3 DISEÑO PARA LA DURABILIDAD

6.3.1 Introducción

Para tener en cuenta todos los anteriores factores de durabilidad las normas internacionales suelen afectar las propiedades del FRP por un factor reductor. De esta manera se aseguran una durabilidad del elemento conforme a la vida de servicio planeada. No obstante, en la mayoría de las normas este factor sólo depende del tipo de FRP puesto y si su disposición es exterior o interior. Sin embargo, hay muchos más

factores que influyen en la durabilidad (temperatura, alcalinidad, humedad, tiempo de diseño) y que no tienen en cuenta a la hora de estimar sus propiedades residuales. Para refinar esta reducción de propiedades habría que diseñar un sistema que tenga en cuenta más factores y los combine de manera adecuada.

Véase a continuación una tabla sobre los factores de los diferentes códigos conforme a efectos medioambientales y carga sostenida

Tabla 6.3: Tratamiento de los FRP, desde el punto de vista de durabilidad, según diferentes normativas					
Factor	ACI440.1R-06	NS3473	CSA-S806-02 CHBDC-2006	JSCE	IStructE
Reducción por deterioro ambiental (ELU)	C_E "Factor reductor ambiental" GFRP: 0.7-0.8 AFRP: 0.8-0.9 CFRP: 0.9-1	η_{env} "factor conversor" GFRP:0.5 AFRP:0.9 CFRP:1	Φ_{FRP} "Factor resistente" GFRP:0.5 AFRP:0.6 CFRP:0.75	$1/\gamma_{fm}$ "factor material" GFRP:0.77 AFRP:0.87 CFRP:0.87	$1/\gamma_m$ "factor material" GFRP:0.3 AFRP:0.5 CFRP:0.6
Reducción por tensión sostenida (ELU)	Pendiente	η_{lt} "factor conversor" GFRP:0.8-1 AFRP:0.7-1 CFRP:0.9-1			
Reducción de resistencia total (ELU)	Incluyendo ϕ (0.5...0.7) GFRP:0.35-0.56 AFRP:0.4-0.63 CFRP:0.45-0.7	GFRP:0.4-0.5 AFRP:0.63-0.9 CFRP:0.9-1		GFRP:0.77 AFRP:0.87 CFRP:0.87	GFRP:0.3 AFRP:0.5 CFRP:0.6
Tensión límite por carga permanente (ELS)	GFRP:0.14-0.16 AFRP:0.24-0.27 CFRP:0.5-0.55	No especificado	GFRP:0.25 AFRP:0.35 CFRP:0.65	0.8x "resistencia de fallo por creep" no más que 0.7 GFRP<0.7 AFRP<0.7 CFRP<0.7	Tensión límite no especificada

En concreto, para el código ACI se describe un factor reductor medioambiental (C_E) que afecta a la resistencia a tracción y que depende del tipo de FRP y exposición

(interior o exterior). A este producto se le conoce como resistencia de diseño a tracción y es la utilizada para el diseño del elemento.

EXPOSICIÓN	TIPO DE FIBRA	$C_E =$ FACTOR REDUCTOR
INTERIOR	CFRP	1.0
	GFRP	0.8
	AFRP	0.9
EXTERIOR	CFRP	0.9
	GFRP	0.7
	AFRP	0.8

Mientras que para tener en cuenta el creep y la fatiga hay que cerciorarse que la tensión que soporta el refuerzo (debido a cargas permanentes y cuasi-permanentes sin mayorar) es menor que la resistencia de diseño a tracción multiplicada por otro factor que depende del tipo de FRP.

Tipo de fibra	GFRP	AFRP	CFRP
Tensión límite por creep	$0.2f_{tu}$	$0.3 f_{tu}$	$0.55 f_{tu}$

Además se considera un factor de seguridad (ϕ) que dependen del esfuerzo de diseño (cortante, tracción, compresión, flexión) y modo de fallo (diseño por rotura del hormigón o fibra)

Este sistema que propone el código ACI[3] es muy genérico y apenas tiene en cuenta la multitud de factores que entran en juego en la durabilidad. Es más, no integra de manera conjunta todos los factores, dividiendo entre los efectos del ambiente (como si el tiempo no afectara al deterioro ambiental) y efectos del tiempo (creep). Esta división atiende a no modificar el modo de fallo a corto periodo debido a los efectos del largo periodo. Esto es, no subestima la resistencia a corto periodo del FRP que de otra manera (es decir, si lo subestimase), si en la fase de diseño se espera la rotura del FRP, al estar éste infravalorado debido a los efectos del largo periodo la rotura real es por compresión del hormigón. Sin embargo, en piezas armadas con FRP, el modo de fallo más adecuado es por compresión del hormigón. Por ello, se considera que, una metodología que reúna de manera conjunta todos los factores que afectan a la durabilidad, sería más acertada y del lado de la seguridad. En orden a ello, a continuación se exhibe una nueva filosofía de diseño propuesta por el Task Group 9.3.

6.3.2 Cálculo del valor de diseño de la resistencia a tracción según modelo más preciso

Se pretende obtener el valor de diseño de la resistencia para que, en base a dicha variable, se pueda calcular de modo seguro y duradero el elemento en cuestión. De hecho, se parte de las propiedades iniciales características del FRP y se multiplica por unos factores que tienen en cuenta los agentes ambientales, el tipo de material y un factor de seguridad. Veamos pues la ecuación propuesta para el cálculo y describamos a continuación sus factores [Fib Task Group 9.3]:

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\eta_{env} \cdot \gamma_f} \quad (6.1)$$

6.3.2.1 Factor reductor ambiental (η_{env})

Este factor tiene en cuenta las propiedades a largo plazo del composite, esto es el creep, junto con otros factores ambientales como la temperatura, humedad, tiempo de vida de diseño y diámetro de la barra. De esta manera se simula un comportamiento lineal doblemente logarítmico entre la resistencia y el tiempo de diseño bajo unas condiciones iniciales de los parámetros. Si algunos de las condiciones reales son diferentes respecto a las condiciones iniciales, se corrige el factor añadiéndole (o restando según sea beneficioso la diferencia) un tiempo virtual equivalente por agravante de la situación inicial. Veamos la ecuación que define el parámetro:

$$\eta_{env} = \frac{f_{fk0}}{\left(\frac{100 - R_{10}}{100}\right)^n \cdot f_{fk1000h}} \quad (6.2)$$

Donde f_{fk0} es la resistencia característica a corto periodo, $f_{fk1000h}$ es la resistencia a 1000h bajo condiciones iniciales. Este valor puede ser obtenido de ensayos de creep o estimarse con la ecuación siguiente. No obstante es recomendado que sea adquirido por medio de ensayos para tener una mayor precisión. R_{10} es el porcentaje de reducción de resistencia por década en una gráfica de creep de ejes doblemente logarítmica. Evidentemente este valor también es necesario de obtener por ensayos o por medio de la literatura, aunque en este caso sería más impreciso. Y por último, n es un exponente que considera los efectos del tiempo de diseño, la humedad, temperatura y diámetro de las barras. Veamos pues la ecuación estimativa de $f_{fk1000h}$

$$f_{fk1000h} = \left(\frac{100 - R_{10}}{100}\right)^2 \cdot f_{fk0} \quad (6.3)$$

Se coge la resistencia a 1000 horas porque evita que los ensayos sean excesivamente largos dando tiempo a desarrollarse los mecanismos de pérdida de resistencia por largo plazo.

Veamos consiguientemente una gráfica de reducción de resistencia típica sobre ejes doblemente logarítmicos.

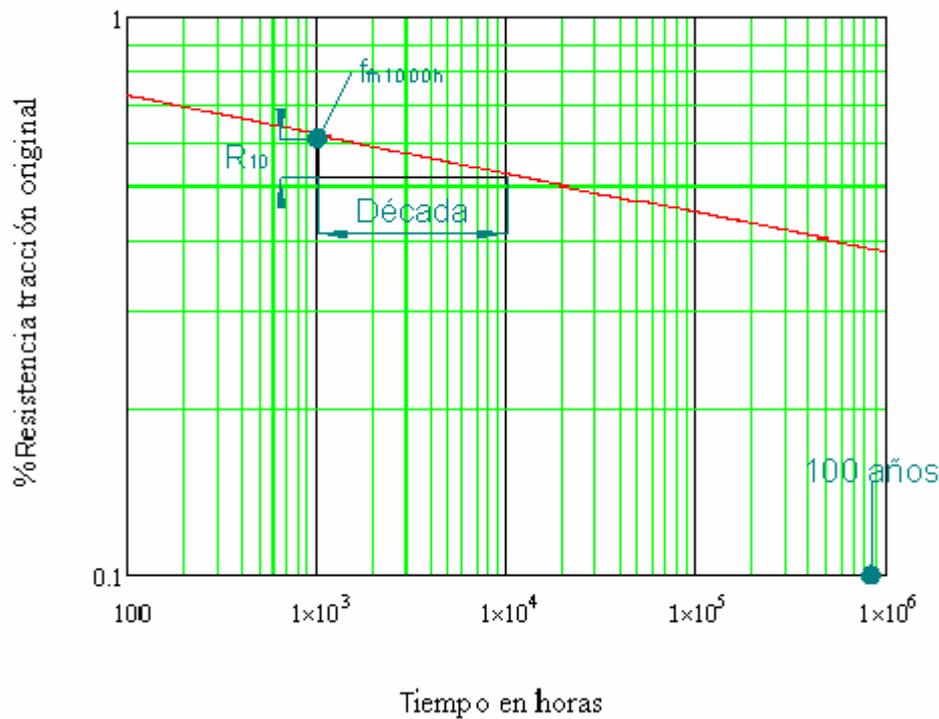


Fig. 6.1: Resistencia de las barras en función del tiempo

Como conclusión, partiendo de un valor de referencia por ejemplo $f_{fk1000h}$ y conociendo la pérdida de resistencia por década, R_{10} , podemos estimar fácilmente la resistencia para cualquier periodo de tiempo suponiendo este comportamiento lineal.

6.3.2.1.1 Término de humedad (n_h)

Es conocido que la humedad puede afectar a la durabilidad, esto obliga a corregir el exponente según la siguiente tabla:

Tabla 6.6: Corrección de la humedad		
Término de corrección de humedad en el hormigón (n_h)		
Seco HR aprox. 50%	Húmedo HR aprox. 80%	Saturado HR 100%
-1	0	1

Como se ve en la tabla se diferencia tres tipos de ambientes:

- 1.- Seco: corresponde con ambientes interiores donde la humedad relativa puede rondar sobre el 50%
- 2.- Húmedo: corresponde con una exposición exterior sujeta a lluvia pero no permanente en contacto con el agua. Humedad relativa alrededor de 80%
- 3.- Saturado: Para casos donde está permanentemente en contacto con el agua. Humedad relativa del 100%

Es fácil darse cuenta que el parámetro inicial de diseño es un ambiente húmedo

donde no se corrige el exponente n.

6.3.2.1.2 Término de la temperatura (n_T)

Como regla general un aumento de la temperatura en 10°C puede duplicar incluso triplicar el índice de reacción de los agentes. Si admitimos una relación lineal doblemente logarítmica entre la resistencia y el tiempo, este aumento de la temperatura significa un descenso de la resistencia equivalente a tres veces el tiempo de exposición. Teniendo en cuenta la relación logarítmica esto equivale a 0.5 aproximadamente de modo que la tabla confeccionada abajo toma correcciones de 0.5 por intervalos discretos de 10°C.

Tabla 6.7: Corrección de la temperatura			
Intervalos de temperaturas más perjudiciales del año (TPA) (n_T)			
TPA <5°C	5°C < TPA <15°C	15°C < TPA <25°C	25°C < TPA <35°C
-0.5	0	0.5	1

Donde el parámetro inicial de diseño se ha considerado con una temperatura de entre 5 y 15°C.

6.3.2.1.3 Término del tiempo de vida de diseño (n_{td})

Es claro que el tiempo es el principal parámetro que afecta a las características del composite. Esto es, cuanto mayor sea el tiempo de diseño mayor será la pérdida debido al creep junto con agentes ambientales agravantes de la situación. De hecho, como se ha visto, afecta de manera directa descendiendo la resistencia linealmente respecto al tiempo en ejes logarítmicos. Para simplificar consideramos que un año (8800h) equivale a 10000h siendo esto una década más respecto a la inicial que es de 1000h y en la que por medio de ensayos obtenemos su resistencia. Mientras que 10 años y 100 años corresponde a 2 y 3 décadas más respectivamente. De ahí la tabla siguiente.

Tabla 6.8: Tiempo de diseño			
Término para especificar tiempo de diseño (n_{td})			
1 año	10 años	50 años	100 años
1	2	2.7	3

6.3.2.1.4 Término corrector del diámetro (n_d)

El diámetro de la barra puede afectar sensiblemente a la durabilidad del elemento debido a un cambio sensible de la difusión de los agentes dentro de éste. Por ello para diámetros de barras más pequeños que los testados presentan un similar deterioro con tiempos de exposición más pequeños y viceversa. Para corregir dicho fenómeno se presenta la siguiente tabla en la que por seguridad para diámetros mayores no se corrige.

Tabla 6.9: Corrección del diámetro			
Término corrector del diámetro (n_d)			
Más grande que test	Igual que test	75% del test	50% del test
0	0	0.5	1

6.3.2.2 Factor reductor del material γ_m

Este coeficiente representa un factor de seguridad para el estudio de los estados límites últimos. Siendo la razón de su existencia la incertidumbre del material así como el margen de seguridad para el tipo de fallo deseado (compresión del hormigón).

Tabla 6.10: Factor de seguridad parcial según los tipos de FRP		
GFRP	AFRP	CFRP
1.3	1.25	1.15

6.3.2.3 Ejemplos

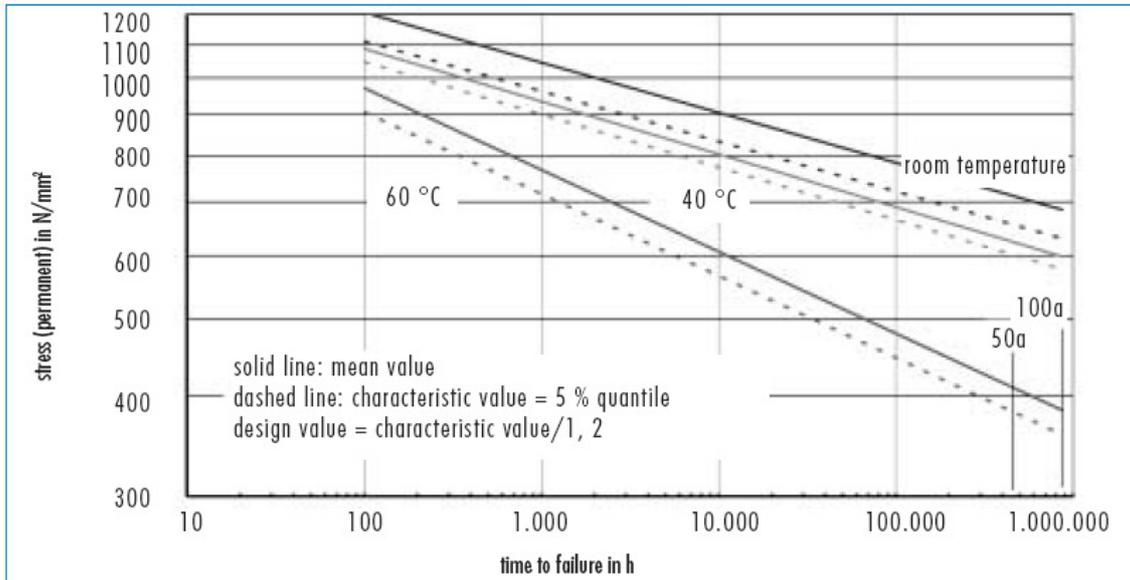
A continuación se exponen una tabla donde se aplica este método para calcular la resistencia de diseño:

Tabla 6.11: Cálculo de la resistencia de diseño según nuevo modelo propuesto													
Material	F_{fk0} MPa	F_{fk1000} MPa	R_{10}	Hum	Temp °C	años serv.	n_h	n_T	n_{td}	n	η_{env}	γ_m	f_{fd} MPa
CFRP	2000	2000	3%	seco	10	100	-1	0	3	2	1.1	1.15	1580
AFRP	2000	1800	15%	seco	17	100	-1	0.5	3	2.5	1.67	1.25	960
GFRP	1400	1100	17%	hum	10	100	0	0	3	3	2.2	1.3	489

Para dotar a este documento de ensayos reales, a continuación se muestran los realizados por un fabricante de GFRP, Schöck ComBAR® [24]. Concretamente sobre barras de 16 mm de diámetro cuya resistencia inicial se estima en 1300 MPa:

La durabilidad de Schöck ComBAR® fue verificada en el siguiente test para un tiempo de vida de 100 años embebida en el hormigón:

- Las barras fueron testadas bajo carga permanente en un hormigón húmedo altamente alcalino (Na_2O -contenido $> 1\%$) hasta el colapso.
- El tiempo hasta el fallo comprende entre 50 y 6500 horas dependiendo del nivel de tensión.
- Las pruebas se realizaron bajo diferentes temperaturas, ambiental ($23^\circ C$), $40^\circ C$ y $60^\circ C$.
- Para cada temperatura hay una línea de valores y una línea de cuantil del 5% obtenidos de los valores experimentales.
- Los resultados que se muestran en el diagrama provienen de una serie de más de 40 pruebas sobre barras de 16 mm de diámetro.



failure stress of ComBAR® in highly alkaline moist concrete

Fig. 6.2: Gráfico de diseño de durabilidad extraído del fabricante Schöck ComBAR®.

El valor característico de la resistencia a tracción se extrapola de los datos para la edad del hormigón deseada.

Esto se realiza en base al cuantil 5%. Para elementos expuestos exteriormente en un clima típicamente europeo el valor característico de la resistencia para una vida de 100 años está definido como $f_{tk} = 580 \text{ N/mm}^2$.

6.4 Conclusiones

- Los factores que intervienen en la durabilidad afectan fuertemente a las propiedades de los FRP. Particularmente los GFRP son gravemente perjudicados, tal como se ha venido mostrando, seguido por los AFRP y por último los CFRP.
- Existen básicamente dos formas de contemplar el efecto de dichos factores:
 - a) La primera, usada por el código ACI y CSA, obtiene la tensión de diseño en base a la residual bajo unas condiciones ambientales (sin tener en cuenta el efecto del creep). Esto es, aplica un factor reductor a la resistencia inicial en función de la exposición del elemento y el tipo de FRP. Esta última es la utilizada para el cálculo de la resistencia de la pieza y comprobación de los ELU. Posteriormente comprueba el efecto del creep y la fatiga bajo las hipótesis de ELS.
 - b) Por el contrario, la segunda y recomendada en este documento, engloba de forma conjunta, todos los factores de durabilidad en el cálculo de las propiedades de diseño. Realmente ocurre así, luego se espera que dicho cálculo sea más acertado y preciso.
- Si tomamos como tensión de diseño la correspondiente a largo plazo, esto es, contemplando todos los factores de durabilidad, la reducción de es tan significativa que puede acercarse a la del acero. Especialmente, esto suele ocurrir en los GFRP cuando la vida de servicio planeada es de 100 años. En tal caso, ya no se debe de hablar de alta resistencia sino, más bien, normal y similar al acero.