

EFFECTO DEL MEDIO AGRESIVO SOBRE LA RESISTENCIA A LA FRACTURA DE ARMADURAS DE POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO**L. Toro¹, J. Fullea¹, C. Andrade¹, P. Comino², A. Miravete³**

¹Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja C/ Serrano Galvache, 4.
28033 Madrid, Spain.
linatoro@ietcc.csic.es

²Saint-Gobain Vetrotex España S.A. Ctra Nacinal II Km 34500
Apdo. 60 28800 Alcalá de Henares (Madrid) Spain

³Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Zaragoza Pedro Cerbuna 12,
50009 Zaragoza

RESUMEN

Se ha desarrollado un nuevo material compuesto de resina reforzada con fibras (FRP) para su uso en armaduras de hormigón como alternativa a los aceros al carbono. Los FRP tienen ciertas ventajas sobre los aceros, debido a su alta resistencia mecánica específica, su característica no magnética, su resistencia a la corrosión y su elevada resistencia a fatiga. Ciertas diferencias respecto al acero, como son su menor ductilidad y su bajo módulo, exigirán cambios en análisis estructural del hormigón armado.

Las fibras más utilizadas son las de carbono, aramida y vidrio. Debido a consideraciones económicas, hasta la fecha las barras de polímeros reforzadas con fibra de vidrio, GFRP, son la opción más frecuente para aplicaciones estructurales. La limitada resistencia a los álcalis en el caso de la fibra de vidrio esta siendo mejorada por adición de ciertos elementos a su formulación.

En el presente trabajo se compara el comportamiento de barras de GFRP fabricadas con diferentes resinas y fibras de vidrio, para analizar su respuesta a ensayos donde se combina la tensión mecánica con el medio agresivo. Los resultados aquí obtenidos junto con otros ensayos de durabilidad, permitirán seleccionar la formulación más adecuada para trabajar en aplicaciones de ingeniería civil. Por medio de la técnica de tracción lenta a velocidad de deformación constante y utilizando probetas prefisuradas se ha podido ver diferencias en el comportamiento a fractura entre las distintas composiciones de los materiales compuestos como es el caso de las armaduras de viniléster reforzadas con fibras de vidrio convencionales y las fibras de vidrio modificadas con zirconio que presentan un comportamiento alcali-resistente.

ABSTRACT

A new fiber reinforced polymer composite (FRP) has been developed for its use in concrete reinforcement as an alternative to carbon steels. The FRP have certain advantages on steel, due to their high specific mechanical resistance, their non-magnetic characteristic, their corrosion resistance and their high fatigue resistance. Certain differences respect to steel, as their smaller ductility and their lower elasticity module, will demand changes in structural analysis of reinforced concrete.

Carbon, aramida and glass, are the fibers most used. Due to economical considerations, GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) bars, are the most frequently chance for structural applications. The limited resistance to alkalis of the glass fibers is being improved by the addition of certain elements to its composition.

In the present work the behaviour of GFRP bars fabricated with different types of resins and glass fibers, is compared in order to analyze their behaviour in tests where mechanical stress and aggressive environments are combined. The results obtained here and in other tests of durability, will allow the selection of the most suitable formulation to work in applications of civil engineering. By means of the Slow Strain Rate test method and using precracked specimens, it has been possible to see differences in the fracture behaviour between the different compositions from the composed materials as in the case of the vinylester bars reinforced with conventional glass fibers and the modified glass fibers with zirconium which present an alkali-resistant behaviour.

PALABRAS CLAVE: Armaduras, material compuesto, hormigón.

1. INTRODUCCIÓN

Se sabe que la durabilidad de las estructuras de hormigón armado se encuentra seriamente limitada por la corrosión que sufren sus armaduras de acero cuando permanecen expuestas a condiciones ambientales adversas. La alta humedad y temperatura, además de la presencia de iones como los cloruros, pueden destruir la capa pasivante que desarrollan los aceros debido a la alta alcalinidad del hormigón. El daño producido por la corrosión de las armaduras no solo influye en la reducción de su sección con su consecuente pérdida de carga portante, también produce pérdida de adhesión entre el acero y el hormigón, y fisuración de éste último debido a las tensiones expansivas generadas por los productos derivados de la corrosión [1].

Para asegurar la vida en servicio de las estructuras de hormigón armado que se encuentran ubicadas en ambientes muy agresivos, es necesario emplear métodos de protección y prevención contra la corrosión. Actualmente no existen soluciones satisfactorias, pues algunas veces se incrementa excesivamente el coste global de la estructura, como es el caso del empleo de armaduras de acero inoxidable o aceros duplex, y en otras ocasiones, como en el caso de la protección catódica, se requiere una atención continua y un personal de mantenimiento capacitado [1]. De esta manera, se hace necesario profundizar en la investigación de nuevos materiales estructurales que puedan ser utilizados como armaduras y mejoren el problema de corrosión.

Hace un par de décadas los materiales compuestos de resina reforzada con fibras (FRP de sus siglas en inglés: *Fiber Reinforced Polymer*) han surgido como una alternativa al uso de aceros como armaduras. El beneficio más obvio al utilizar este tipo de materiales es que, a diferencia del acero, los FRP no son susceptibles de sufrir corrosión. Éste hecho, hace que su uso sea una opción interesante para incrementar la vida en servicio de estructuras de hormigón que se encuentran en ambientes severos. Otras ventajas que aportan son su carácter no magnético, su baja densidad, alta resistencia mecánica específica y su elevada resistencia a fatiga [2]. Sin embargo, tienen como desventajas su bajo módulo de elasticidad, su poca ductilidad y lo que es más importante, la falta de conocimiento para su uso entre los ingenieros.

En la actualidad se producen diferentes tipos de barras de FRP, fabricadas mediante proceso de pultrusión, y elaboradas con ciertos acabados superficiales: como recubrimiento de arena, superficie rugosa, envoltura helicoidal, corruga, etc., que buscan mejorar la adherencia de las barras al hormigón. Comercialmente se emplean para su fabricación resina epoxi, viniléster, polipropileno o poliéster, y fibras de carbono, aramida o vidrio. Sin embargo, la fibra de vidrio y el viniléster suelen ser los materiales más empleados, debido a su

bajo costo comparado con otros y a su alta resistencia química, en el caso del viniléster.

Existen diferentes tipos de fibras de vidrio: el vidrio E (eléctrico) es el más empleado, a pesar de ello, varios estudios han demostrado serios problemas de deterioro en barras expuestas a ambientes altamente alcalinos [3,4]. El vidrio tipo AR (Álcali-Resistente) es otro tipo de fibra muy novedosa, que presenta una modificación en su composición respecto al vidrio corriente, contiene dióxido de circonio, lo cual le brinda una alta resistencia a los álcalis y a los ácidos. Ésta propiedad podría mejorar la durabilidad de los FRP fabricadas con dichas fibras de vidrio. La marca más conocida comercialmente, es Cem-Fil [5], que actualmente se utiliza en diferentes aplicaciones de ingeniería civil, por ejemplo, como fibras cortas para construir paneles de revestimiento de edificios, debido a su bajo peso y buena durabilidad, o para la fabricación de cementos reforzados (GRC).

El uso de barras de GFRP dentro del campo de la construcción es una aplicación muy reciente. Durante años los materiales compuestos han tenido una alta demanda en la industria aeroespacial y automotriz, pero dentro de la industria de la ingeniería civil a penas se están desarrollando, por lo tanto, si se pretenden utilizar las barras de GFRP dentro de este campo, será necesario profundizar en la investigación de su comportamiento, para conocer su respuesta estructural y su durabilidad a largo plazo. Finalmente, será necesario hacer nuevos códigos y recomendaciones de diseño de estructuras armadas con barras de GFRP, ya que el comportamiento de estos materiales es completamente diferente al de los aceros.

El presente trabajo se puede dividir en dos partes fundamentales, en la primera parte se estudió experimentalmente el comportamiento frente a la durabilidad de diferentes tipos de barras de GFRP, utilizando ambientes agresivos que simulaban condiciones reales. Se desarrollaron ensayos de inmersión en disoluciones de diferente naturaleza, mantenidas bajo diferentes temperaturas, con el objetivo de reconocer el tipo de disoluciones que causaba más daño a las barras y el efecto que tiene la temperatura y los ciclos térmicos sobre su deterioro y estabilidad. En la segunda parte se utilizó la técnica de tracción lenta a velocidad de deformación constante, para analizar la degradación causada por la acción simultánea y sinérgica de un medio corrosivo y de una tensión de tracción estática. Éste ensayo proporciona información más rápidamente de lo que se obtendría de la experiencia en servicio, pero al mismo tiempo sirve para predecir el comportamiento en servicio de las barras.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Como se mencionó anteriormente, el trabajo se divide en dos partes, ensayos de durabilidad y ensayo de

tracción lenta. A continuación se explicará cada uno de los ensayos.

2.1. Ensayos de durabilidad

- Descripción del Ensayo

Este ensayo se realizó para analizar experimentalmente la durabilidad de las armaduras de GFRP a corto y largo plazo, analizando su reacción frente a diferentes medios agresivos y su estabilidad frente a diferentes temperaturas de trabajo. Se hicieron ensayos de inmersión en disoluciones y ensayos con barras embebidas en mortero.

Para el ensayo en disoluciones de inmersión se emplearon 6 tipos distintos de disoluciones de ataque, bajo 3 condiciones diferentes de temperatura, como se observa en la tabla 1. Cada una de las disoluciones simula condiciones ambientales reales. El agua destilada sirve como una disolución de referencia, aparte de simular ambientes con elevada humedad. Las disoluciones muy alcalinas simulan el ambiente que se encuentra dentro del hormigón, es decir, la composición del cemento hidratado, y el caso de la disoluciones con cloruros simularía situaciones de estructuras situadas en ambientes costeros. Los pH no tan alcalinos representan hormigones carbonatados. Finalmente, la disolución ácida se utilizó pensando en aplicaciones de estructuras dentro de plantas químicas.

Periódicamente se registraron cambios en la apariencia externa e interna de la barra, posibles daños en la fibra, en la matriz o en la interfase mediante análisis por SEM y EDAX. Se hizo un seguimiento de variación de masa (ASTM D 5229 [6]) y de las propiedades mecánicas, específicamente, el módulo de elasticidad dinámico.

Tabla 1. Disoluciones de Inmersión y condiciones de temperatura

DISOLUCIONES		Temperatura
Descripción	pH	
A. Agua destilada	8.61	25°C, 60°C
B. Muy alcalina	13.5	25°C 60°C Hielo-Deshielo
C. Muy alcalina con cloruro	13.5	
D. Alcalina con cloruros	12.6	
E. Alcalina	12.7	
F. Ácida	3	

La formulación de las probetas de mortero se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C192 [7]. Adicionalmente, se añadió un 3% de cloruros en el agua de masado para incrementar la agresividad de la pasta. Para la fabricación de las probetas se utilizaron barras de GFRP sin modificar y barras previamente envejecidas, mediante ciclos térmicos (+25°C a +60°C), y ciclos de hielo-deshielo (-15°C a -60°C). Las barras se embebieron en las probetas de mortero fresco, y al fraguar, se llevaron a una cámara con ambiente húmedo al 100% y temperatura 25°C, donde permanecieron durante 11 meses. Finalizado este tiempo, se rompieron

los morteros para extraer las barras (ver figura 1), se midieron cambios en el módulo de elasticidad dinámico y se estudiaron posibles variaciones estructurales mediante microscopía.



Figura 1. Probetas de mortero con barra embebida

- Materiales

En la tabla 2 se especifican los componentes de las barras de GFRP utilizadas para los ensayos, y sus características más generales. Se emplearon barras de diámetro de 10 mm, y antes de comenzar cualquier ensayo, fue necesario acondicionarlas según la norma ASTM D618 [8] para eliminarles toda la humedad y garantizar medidas correctas (especialmente las de masa).

Tabla 2. Identificación de las Barras de GFRP

Nombre	Resina	Fibra Vidrio	Vf %	Apariencia
VAR	Viniléster	AR	60.3	
VE	Viniléster	E	56.1	
Essai B	Polipropileno	AR	30.1	
Tondo Ap	Poliéster	AR	65.5	
Tondo Av	Viniléster	AR	70.4	

2.2. Ensayo de tracción lenta

- Descripción del Ensayo

Para realizar el ensayo se utilizó una máquina de tracción lenta o máquina universal, que posee un rango de velocidades entre 5000µm/min y 0.1 µm/min, un límite de carga de 100 KN y un recorrido de 10000 µm. A esta máquina se adaptó una celda de corrosión bajo tensión, dentro de la cual se sitúa la probeta. La celda se sella en la parte inferior mediante un sistema de juntas para evitar la salida de la disolución de ataque. Además, la celda se encuentra aclimatada por una camisa exterior de agua, conectada a un calentador con termostato que mantiene la temperatura constante del ensayo. En la figura 2 se muestra el montaje del ensayo.

Las probetas se sometieron a una carga de tracción con velocidad de deformación baja ($5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), hasta alcanzar la rotura, mientras se mantenían en contacto con una disolución muy alcalina con cloruros a 60°C. Se utilizaron dos tipos de barras de GFRP de viniléster, con fibra de vidrio tipo E y AR (VAR, VE), de 350 mm de largo, y con una entalla en el medio que permitía acelerar el proceso de rotura. La longitud inicial de la entalla fue de 5mm, aproximadamente.

También se hicieron ensayos con las probetas “al aire”, es decir sin emplear disolución, con el objeto de

comparar los resultados de ambas condiciones y estudiar de esta manera la susceptibilidad de las barras a la degradación bajo tensión.



Figura 2. Ensayo de tracción lenta

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Ensayos de durabilidad

En los resultados de los ensayos de inmersión en disoluciones y en mortero, se observó que las barras de polipropileno (Essai B) tienen una baja durabilidad. La figura 3 muestra que a los 120 días de inmersión, su peso incrementó un 1%, mientras que las barras de viniléster y poliéster son más impermeables al medio, y sufrieron pequeñas variaciones, inferiores al 0.4%.

También se observó que el vidrio E se degrada más que el AR. La figura 4 muestra el comportamiento de las barras VAR y VE, que tienen el mismo tipo de resina de viniléster e idéntica formulación, pero que se diferencian en el tipo de fibra de vidrio que poseen. Se observó que, a diferencia de las barras fabricadas con vidrio AR (VAR), las barras de vidrio E (VE), sufrieron incrementos muy leves o incluso pérdidas de peso, lo que se explica porque el incremento de peso debido a la absorción de disoluciones se contrarresta por la pérdida de peso que presentan las fibras al ser atacadas por el medio.

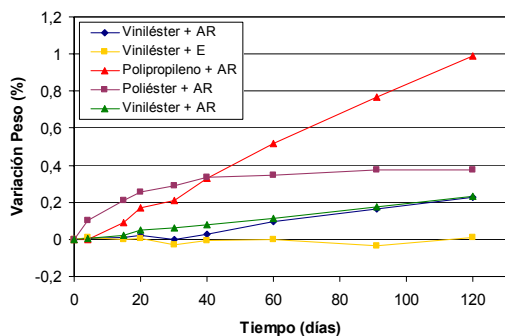


Figura 3. Barras de GFRP inmersas en disolución de pH=13.5 con cloruros, T=25°C

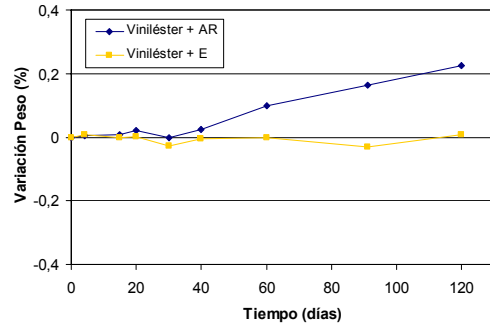


Figura 4. Barras de viniléster con fibra de vidrio AR y vidrio E, T=25°C

En general, se observó que cuando se trabajaba a 60°C la variación de peso era mayor, debido a que elevadas temperaturas suponen mayores velocidades de difusión de los iones y mayor agresividad de los mismos. En la figura 5 se muestra la variación de peso de la barra de polipropileno a las tres temperaturas de trabajo, se ve que el incremento de peso es más del doble cuando trabaja a temperaturas superiores, y que el efecto de las altas temperaturas es mayor que el efecto de los ciclos de hielo-deshielo.

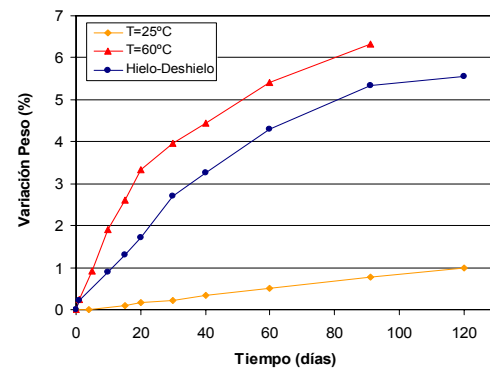


Figura 5. Barra de polipropileno inmersa en disolución pH=13.5 con cloruros, a diferentes temperaturas

La condición de hielo-deshielo produce un mayor efecto sobre el módulo de elasticidad de las barras. Como se ve en la figura 6, las barras embebidas en mortero y previamente envejecidas mediante hielo-deshielo, sufrieron mayores pérdidas de rigidez que las barras envejecidas con ciclos térmicos. Esto se debe a que bajo dicha condición, las barras se encuentran sometidas a fatiga por choque térmico. En la figura 6 también se observa que las barras de polipropileno (Essai B) presentan las mayores pérdidas, mientras que las barras de viniléster y vidrio AR no sufren tanta variación.

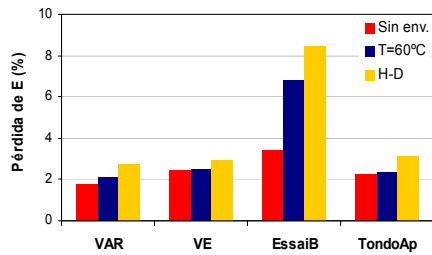


Figura 6. Pérdida de E para barras embebidas en mortero 11 meses

Antes de comenzar con los ensayos de durabilidad, se hizo un análisis de microscopía electrónica de todos los tipos de barras para reconocer sus estructuras y tener como referencia para comparar con las micrografías de las barras atacadas. En general, se observó que, en casi todas las barras las fibras se repartían uniformemente a través de la resina, excepto en las barras de polipropileno, que presentaban poros y espacios vacíos sin resina, tal y como se representa en la figura 7. Éste hecho explica porque las barras de polipropileno sufrieron los mayores incrementos de peso y las mayores pérdidas de rigidez durante el ensayo de durabilidad.

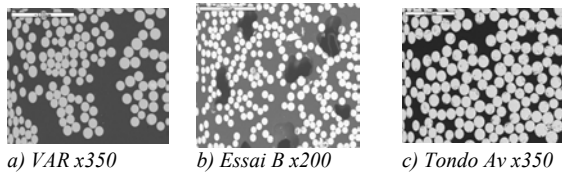


Figura 7. Distribución de las fibras al interior de las barras

En el análisis de las barras que habían estado inmersas en las disoluciones y en mortero, no se observó ninguna evidencia de deterioro en las interfaces barras/mortero y fibra/matriz. En la figura 8 se observa la interfase barra mortero, el diseño de la superficie exterior de todas las barras fue óptimo, permitiendo la buena adherencia entre los dos materiales.

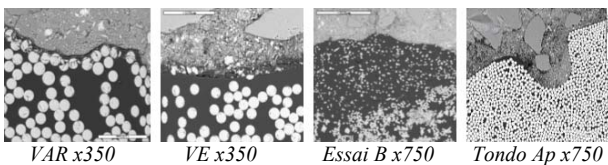


Figura 8. Representación de la adherencia entre la barra y el mortero. Interfase barra/mortero

3.2. Ensayo de tracción lenta

Los resultados encontrados con este ensayo tuvieron mucha dispersión, algunas barras presentaban un comportamiento frágil, mientras que otras tenían una zona un poco más plástica. Dicho comportamiento se puede observar en las figuras 9 y 10, que representan las curvas de las barras de viniléster con vidrio E (VE) y de viniléster con vidrio AR (VAR) respectivamente, en el

ensayo realizado al aire y en disoluciones. Además, se observó en los dos tipos de barras ensayadas que, al realizar el ensayo de tracción lenta mientras la probeta permanecía en contacto con la disolución de alcalina, el área bajo la curva de tensión-deformación era, en general, menor comparada con las curvas del ensayo al aire, es decir, la disolución afecta la tenacidad de las barras y la resistencia máxima alcanzada.

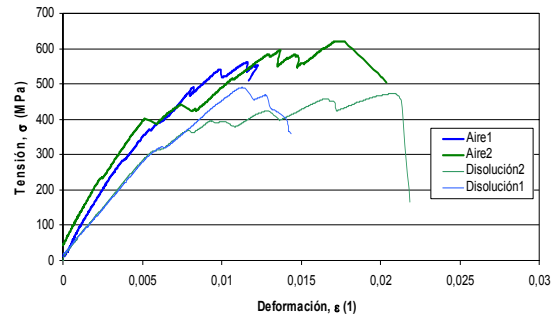


Figura 9. Curvas tensión-deformación barra de viniléster con vidrio AR.

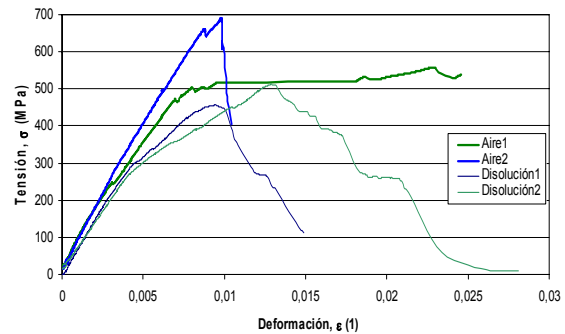


Figura 10. Curvas tensión-deformación barra de viniléster con vidrio E.

Sin embargo, dichas variaciones entre los ensayos realizados al aire o en disolución no fueron muy significativas, lo cual se debe a la corta duración del ensayo en disoluciones, debido a que el medio de ataque no tuvo tiempo suficiente para alcanzar a penetrar al interior de las barras y causar un ataque, esas pequeñas diferencias se pueden atribuir al efecto de la temperatura de trabajo.

Por otro lado, se observó que las barras de vidrio E tuvieron mejor comportamiento mecánico que las barras de vidrio AR, inclusive en los ensayos en disolución. Esto se debe a que la fibra de vidrio E es mucho más resistente mecánicamente que el vidrio AR, por lo tanto, si la disolución no alcanza a penetrar dentro de la probeta, las propiedades de las barras con vidrio E seguirán siendo mayores. En la bibliografía se encuentra que en ensayos de más larga duración, el comportamiento mecánico del vidrio AR es superior al vidrio E [9, 10, 11].

4. CONCLUSIONES

Las barras de polipropileno no resultan convenientes para ser utilizadas en aplicaciones estructurales de ingeniería civil, ya que presentaron grandes pérdidas de rigidez y altos porcentajes de absorción de disoluciones, cuando se sometieron a ensayos de durabilidad. La configuración de este tipo de barras no es adecuada: su bajo porcentaje de volumen de fibra, su mala compactación y porosidad, hacen que sean barras poco resistentes y permeables a la penetración de disoluciones.

El viniléster es una resina adecuada para la fabricación de las barras de GFRP, pues las barras fabricadas con esta matriz (VAR, VE y Tondo Av) fueron las que mejor comportamiento presentaron. El tipo de fibra de vidrio que se utilice es importante, las barras VE están hechas con vidrio E, y poseen propiedades mecánicas iniciales superiores a las VAR, no obstante, cuando las VE están en contacto con disoluciones muy alcalinas sufren pérdidas significativas, situación que no es conveniente en aplicaciones con ambientes como el hormigón.

Las barras fabricadas con poliéster (Tondo Ap) poseen buenas propiedades mecánicas iniciales debido al alto porcentaje de fibras dentro de la matriz y su buena configuración. A pesar de ello, después de permanecer dentro una disolución alcalina durante 120 días presentaron pérdidas de resistencia de hasta el 10%.

Respecto a las condiciones de temperatura utilizadas, se puede decir que trabajar a 60°C aumenta la velocidad de difusión de los iones y la agresividad de los mismos, por lo tanto los % de variación de masa son mayores. La condición de hielo-deshielo produce un gran efecto sobre el módulo de elasticidad de las barras, debido que bajo dicha condición las barras se encuentran sometidas a fatiga por choque térmico.

A corto plazo, la resistencia mecánica de las fibras de vidrio tipo E es más elevada que la del vidrio AR, no obstante, el comportamiento de las fibras frente a la degradación es un factor importante en aplicaciones sometidas a ambientes alcalinos, donde la fibra de vidrio AR presenta demostradas ventajas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Vetrotex S.A., empresa que ha suministrado el material utilizado en este trabajo, y al Consejo superior de Investigaciones Científicas, CSIC, por la beca I3P que ha permitido financiar la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Feliú S., Andrade C. "Manual: inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras" CSIC. Madrid, 1989.
- [2] Lopez-Anido, R. and Karbhari, V.M. "Emerging materials for civil infrastructure – state of the art". Chapter 2: "Fiber Reinforced Composites for Civil Infrastructure" Editado por Lopez-Anido, R. y Nair, T.R. ASCE. , 2000
- [3] Tannous, F.E., "Durability of non-metallic reinforcing bars and prestressing tendons", PhD dissertation, Dept. of Civ. Engrg. and Engrg. Mech., University of Arizona, Tucson, Ariz. 1997.
- [4] Uomoto, T. and Katsuki, F., "Prediction of deterioration of FRP rods due to alkali attack", Non-Metallic (FRP) Reinforcements for Concrete Structures, Gent, Belgium, 1995, 108-115.
- [5] Saint –Gobain Vetrotex. "Glass fiber for concrete reinforcement", Technical Data Sheet, available in <http://www.cem-fil.com/>.
- [6] ASTM D 5229 "Moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials".
- [7] ASTM C 192 "Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory"
- [8] ASTM D 618 "Standard practice for conditioning plastics for testing"
- [9] Miravete, A. et al. "Comportamiento de la fibra de vidrio AR para aplicaciones estructurales en la construcción". Materiales de Construcción. Vol. 55, No. 280. España, 2005.
- [10] Toro, Lina. "Estudio sobre la durabilidad de barras poliméricas reforzadas con fibra de vidrio en contacto con hormigón". Universidad Carlos III, Departamento de Ingeniería de Materiales. Madrid, 2006.
- [11] Román F.J. "Estudio del comportamiento mecánico y a corrosión del hormigón reforzado con barras de materiales compuestos de polímero y fibra de vidrio". Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Mecánica, noviembre, 2005.