

ESTUDIO DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA DE PROBETAS DE GRC ENSAYADAS A TRACCIÓN

A. Enfedaque, V. Sánchez Gálvez

Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n,
28040 Madrid, España.
aenfedaque@mater.upm.es
vsanchez@mater.upm.es

RESUMEN

El GRC (Glassfiber Reinforced Cement) es un material compuesto de matriz cementícea reforzado con fibras de vidrio cortadas y dispuestas al azar en dos dimensiones. A edades tempranas, el material presenta una resistencia a tracción y una ductilidad mayor que la del mortero sin reforzar. Sin embargo, el GRC presenta una grave pérdida de propiedades mecánicas con la edad. Numerosas investigaciones han tratado de resolver el problema mediante adiciones de humo de sílice, puzolanas, resinas acrílicas, etc.

Se ha estudiado este fenómeno mediante la realización de una campaña de ensayos de tracción hasta rotura sobre probetas rectangulares de GRC joven, y de GRC envejecido mediante inmersión en agua a 50°C durante 40, 80 y 120 días, empleando diferentes formulaciones de GRC. Una vez realizados los ensayos se ha llevado a cabo un estudio de la microestructura de las superficies de fractura mediante microscopía electrónica de barrido. Mediante el estudio de las fractografías realizadas se ha llegado a la conclusión de que la adición de metacaolín en la composición modifica la microestructura permitiendo que un mayor número de fibras sean arrancadas y no fracturadas, mejorando las propiedades del material. Así mismo se comprueba cómo el proceso de degradación de las fibras se produce principalmente durante edades tempranas estabilizándose para los casos de probetas envejecidas durante 80 y 120 días.

ABSTRACT

GRC is a composite material produced by the union of a cement mortar matrix and chopped glass fibers randomly sprayed in two directions. When the material is young it has greater tensile strength and greater ductility than the plain cement mortar. However GRC losses its mechanical properties with time. Many investigations have tried to solve this problem by adding chemical products to the mortar paste such as Silica fume, pozzolans or Acrylic resins.

This phenomenon has been studied by performing a tensile test programme on rectangular samples of young GRC, and on GRC samples aged by immersion in hot water at 50 °C during 40, 80 and 120 days using different GRC's formulations. Once the tests have been carried out, a microstructural analysis has been made using a Scanning Electronic Microscope. Studying the pictures, it can be concluded that the reduction of mechanical properties of GRC with time can be reduced by adding metakaolin to GRC's formulation. Metakaolin changes GRC's microstructure enabling more fibers to be pulled-out from the matrix instead of broken in aged GRC. There are evidences that show that the main degradation of glass fibers happens mainly during GRC early ages being more stable for samples aged 80 and 120 days.

PALABRAS CLAVE: GRC, fractografías, envejecimiento acelerado

1. INTRODUCCIÓN

El GRC es un material que está formado por la unión de dos materiales con propiedades totalmente diferentes: mortero de cemento y fibras de vidrio cortadas y proyectadas aleatoriamente junto con el mortero en dos dimensiones [1]. La unión de los dos materiales nos proporciona un material que reúne las mejores propiedades de ambos y que mejoran las propiedades individuales de cada uno. En el caso del mortero de cemento la inclusión de fibras de vidrio mejora la ductilidad del mismo y la resistencia a tracción; así como la presencia de mortero de cemento mejora los problemas de esbeltez que pueden aparecer cuando se comprimen las fibras de vidrio. Por lo tanto cuando

tenemos la unión de ambos materiales lo que se obtiene es un material que tiene una resistencia a tracción y ductilidad mayor que el mortero de cemento y que tiene también una resistencia a compresión alta ya que la que proporciona el mortero de cemento no se ve reducida por la inclusión de las fibras de vidrio [2].

Por lo tanto con la unión de estos materiales tenemos un compuesto de cemento el cual se caracteriza por las buenas propiedades mecánicas y que no necesita armaduras. Esto nos da un material que tiene una versatilidad de diseño enorme ya que se pueden lograr elementos con casi cualquier forma con espesores de alrededor de 10 mm.

Las propiedades anteriormente citadas sufren cambios con el paso del tiempo. Esto ha sido comprobado en

estudios anteriores [3-6]. Los cambios en el comportamiento del material son graves ya que se pasa de un material con una ductilidad alta a un material frágil en el que se ha reducido también la resistencia a tracción. Numerosos estudios han hallado que es la corrosión de la fibra de vidrio debido al entorno altamente alcalino en el que se encuentra la razón principal que se tiene para el cambio de propiedades del material. [7]. Para solucionar este problema se llevo a cabo el desarrollo de fibras de vidrio realizadas con nuevas formulaciones resistentes a la corrosión alcalina, estas fibras fueron denominadas fibras de vidrio AR (Álcali Resistant). Sin embargo los efectos perniciosos del paso del tiempo en el comportamiento del compuesto siguieron presentándose.

Para intentar reducir los efectos de la alcalinidad en las fibras de vidrio se ha realizado GRC en cuya formulación se han incluido diferentes adiciones [8-9]. Sin embargo los resultados que se obtuvieron mostraban grandes dispersiones en función de las adiciones empleadas y las proporciones en las que estas se incluían en las formulaciones.

Para confirmar los efectos citados se ha realizado una campaña de ensayos de GRC con formulaciones modificadas y se ha realizado una serie de ensayos de tracción y fractografías para comprobar los efectos de las adiciones en la microestructura del material.

2. PLAN DE ENSAYOS

Para confirmar e intentar analizar los mecanismos que provocan el comportamiento del GRC envejecido se ha realizado una campaña de ensayos de tracción con GRC realizado con 5 formulaciones de cemento en la que se han incluido 3 adiciones. Las adiciones que se han empleado son: humo de sílice, metacaolín y resinas acrílicas. Las cantidades que se han empleado son las que aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Formulaciones de morteros de cemento

	Cemento	Arena	Agua	plastificante	Adición
Control	50 Kg.	50 Kg.	20.l	0.5 litros	-----
Metacaolín	50 Kg.	50 Kg.	22.l.	0.5 litros	5 Kg.
Humo sílice 10%	50 Kg.	50 Kg.	23 l.	0.5 litros	5 Kg.
Humo sílice 20%	50 Kg.	50 Kg.	27 l.	0.5 litros	10 Kg.
Acrílicas resinas	50 Kg.	50 Kg.	20 l.	0.5 litros	2 Kg.

Se realizaron con la colaboración de PREINCO S.A. una serie de 10 paneles de 1.2x1.2m y 10 mm. de espesor. De estos paneles se desechó un marco de 5 cm alrededor del contorno para evitar las condiciones de contorno que surgen en la fabricación de los mismos. Una vez eliminada esta parte se realizó el corte de las probetas para los ensayos. Las probetas que se han elegido son rectangulares con unas dimensiones de 300x50 mm. Los ensayos se han realizado a 28 días y a 40, 80 y a 120 días de envejecimiento acelerado mediante inmersión en agua caliente a 50°C.

Para el proceso de envejecimiento con agua caliente nos hemos basado en las investigaciones realizadas con morteros de cemento convencionales y modificados [11] en las que se establecen las equivalencias de tiempo de envejecido entre días de exposición a la intemperie en el Reino Unido y los días sumergidas en agua caliente. Las equivalencias se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Equivalencia envejecimiento acelerado

1 día a ..	→	días de exposición en RU
80°C		1672
70°C		693
60°C		272
50°C		101

Desde el punto de vista experimental el sistema más sencillo para lograr conseguir un envejecimiento acelerado fue la inmersión de las probetas a la temperatura más baja posible por lo que se mantuvieron las probetas sumergidas a 50 °C durante periodos de 40, 80 y 120 días. Las edades por tanto a las que equivalen estos periodos de envejecimiento son las que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Equivalencia envejecimiento acelerado

Tiempo de inmersión	Edad material
40 días a 50 °C	11 años
80 días a 50 °C	22 años
120 días a 50 °C	33 años

Se han elegido estos plazos por amoldarse bien tanto al plazo de la investigación como a las edades en las que queremos estudiar la pérdida de propiedades del material real. El periodo que marcan estos años comprende ampliamente la edad dentro de la cual se produce la degradación de las propiedades del GRC

3. REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

Una vez que se han envejecido las probetas de GRC estas se sacaron de los baños de agua caliente y se almacenaron en una cámara climática a 20 °C y al 98% de humedad. El periodo de almacenamiento que transcurrió entre el envejecimiento y el ensayo de las probetas no fue superior al mes y medio y por lo tanto el envejecimiento adicional que se produjo en la cámara climática en la que se almacenó el material después de estar sumergido en agua caliente se puede considerar despreciable.

Para realizar los ensayos las probetas fueron, como se indicó anteriormente, cortadas con forma rectangular y con unas dimensiones de 300x50 mm. Se recuerda que el espesor medio aproximado de las placas es de 10 mm. El espesor cambia de unas probetas a otras, debido a que el proceso de fabricación de las placas es un proceso manual. Debido a esto se pueden encontrar variaciones del espesor de un par de milímetros dentro de la misma probeta.

El ensayo de tracción simple se realizó en un maquina Instron 8501 la cual tenía montada una célula de carga

de 2.5 toneladas y que sujetaba la probeta con unas mordazas mecánicas.

La instrumentación del ensayo se compone de dos extensómetros dispuestos a los lados de las probetas. Estos tienen una distancia entre cuchillas mayor de lo habitual para aumentar las posibilidades de que la fractura se encuentre en esta zona y por tanto de poder recoger datos de cómo se produce la misma

Los ensayos se han realizado en control de desplazamientos fijando una velocidad de desplazamiento entre las mordazas de 1 mm/minuto.

En la figura 1 se puede ver la disposición de la probeta y del montaje de todos los elementos durante el ensayo

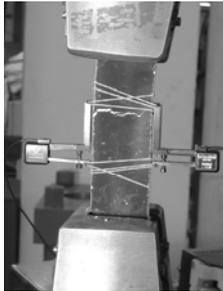


Figura 1. Montaje ensayo tracción

Se puede apreciar en esta foto como la probeta tiene un color negro el cual no es el natural del material. Para poder apreciar de manera más clara las fisuras que se producen en el material se pintó de negro para que las pequeñas fisuras de color claro resaltaran dentro del color negro general de la probeta.

Los ensayos se han realizado hasta la rotura total de las probetas, hasta que las mismas se han separado en dos trozos diferenciados y sin fibras puenteandolos.

4. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Una vez realizados los ensayos se han analizado las superficies de fractura de las probetas para buscar diferencias y analogías entre ellas y para intentar correlacionar el comportamiento del material con sus características micromecánicas. En la figura 2 se muestra el resultado de los ensayos; se puede ver la probeta totalmente dividida en dos trozos bien diferenciados y se muestra también la zona a partir de la cual vamos a obtener las muestras que van a ser observadas en el SEM.

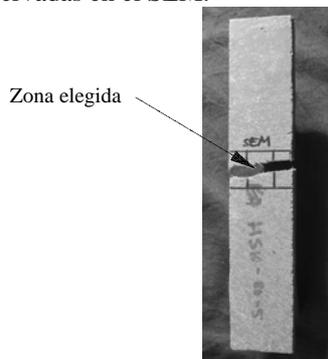


Figura 2 Esquema probeta ensayada

En la figura 2 se puede ver como la zona cercana a la fractura ha sido dividida en tres zonas diferentes. Debido a las limitaciones de espacio que aparecen en el interior del SEM no se ha podido analizar toda la zona de fractura y se ha elegido la zona central de la misma para evitar dentro de lo posible los efectos de borde que han podido aparecer en las zonas laterales de las probetas.

Una vez realizado el corte de las muestras se ha realizado la metalización de las superficies para conseguir su visionado en el microscopio electrónico de barrido. La metalización se ha realizado mediante la deposición de oro en la superficie de fractura.

Después del proceso de metalización se ha realizado la obtención de las fractografías de las diferentes muestras.

5. FRACTOGRAFÍAS OBTENIDAS

Se han conseguido las siguientes micrografías del material joven (figuras 3 y 4).

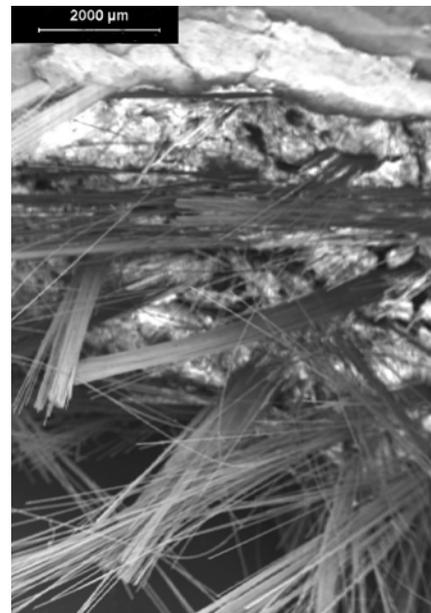


Figura 3. GRC joven sin adiciones

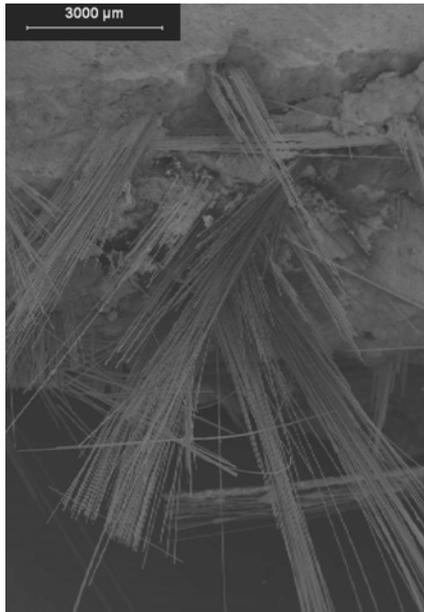


Figura 4. GRC joven con 10% con humo sílice



Figura 5. GRC envejecido 40 días con 20% humo sílice



Figura 6. GRC envejecido 40 días con 10% metacaolín

Se puede ver como la fractura en el material se produce de manera análoga en las figuras 3 y 4. Las imágenes tomadas del resto de formulaciones muestran superficies de fractura con características similares. No se aprecian grandes diferencias ni en el número de fibras rotas ni en la cantidad de fibras arrancadas. Por lo general se puede afirmar que el fallo del material se produce en las zonas en las que hay menos cantidad de fibras o bien en las zonas en las que la matriz tiene un defecto, esto corresponde a zonas donde el material es más débil. Además de esto se puede asegurar que el modo principal de fallo de las fibras es por arrancamiento. Esto es fácilmente comprobable ya que en las fractografías se puede ver como los filamentos de las fibras de vidrio están enteros. También se puede ver en las fractografías como las superficies de fractura son muy abruptas; esto cuadra con las teorías existentes del proceso de fractura del material joven. En estas teorías se afirma que a partir de una zona donde hay una serie de fisuras microscópicas se produce el crecimiento de la fisura pésima. A partir de las microfisuras se produce el crecimiento de las mismas hasta que aparece una zona más resistente, esta zona son las fibras, el crecimiento se detiene y comienza por otra parte. Durante este proceso la carga sigue aumentando. Cuando la carga llega al valor límite de crecimiento de la grieta esta vuelve a empezar a crecer buscando las zonas más débiles del material. Siguiendo este proceso lo que tiene lugar es una búsqueda de las zonas más débiles del material.

En las figuras 5 y 6 se muestran las fractografías que se han obtenido para las muestras envejecidas 40 días en agua caliente.

La edad equivalente de dichas probetas es de unos 11 años. El modo en el que se ha desarrollado la fisuración en estas probetas es totalmente diferente que en el caso del GRC joven. La topología abrupta de la fractura se ha transformado en una mucho más regular, teniendo pocos entrantes y salientes. Otro aspecto que hay que tener en cuenta es la reducción del número de fibras que se han arrancado del material. La pregunta que surge en este momento es qué ha pasado con las fibras. La respuesta que se obtiene de manera irrefutable de las fractografías en estas se ve que se ha producido la rotura frágil de las fibras. Esto es fácilmente comprobable mirando con atención las figuras anteriores. En estas se puede ver como las fibras que se

han roto son numerosas y como estas están cortadas prácticamente al ras de la superficie de fractura. La única diferencia que existe entre las distintas composiciones casos estudiados es el menor número de fibras rotas en el caso de las muestras realizadas con un 10% de metacaolín.

En el caso de las probetas envejecidas durante 80 días las micrografías se pueden ver en las figuras 7 y 8.



Figura 7. GRC envejecido 80 días con 10% humo sílice

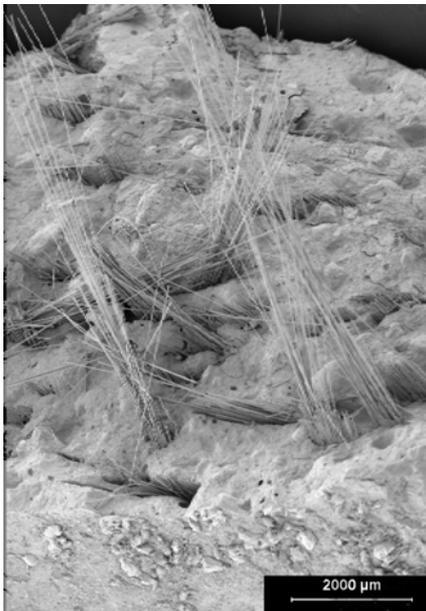


Figura 8. GRC envejecido 80 días con 10% metacaolín

En estas micrografías se vuelven a reproducir las características que ya han sido citadas para los casos de las probetas envejecidas durante 40 días. Las superficies de fractura son aún más regulares. Se ha producido un leve aumento del número de fibras que se han roto. En el caso de las probetas realizadas con metacaolín se confirma la tendencia que se apuntó para el caso de las probetas envejecidas 40 días. Aparece un número menor de fibras rotas que en el resto de los casos, pero

también existe una reducción del número de fibras arrancadas en comparación con las muestras envejecidas 40 días.

Para las probetas envejecidas 120 días se corroboran los fenómenos observados en el GRC envejecido 40 y 80 días. Se puede así también asegurar que los efectos de la presencia de metacaolín en el GRC sigue manteniendo su influencia después de un envejecimiento equivalente a 33 años de exposición a la intemperie ya que el número de fibras que aparecen en la fractografía correspondiente es mayor que en el resto de las composiciones. Esto se puede apreciar observando las figuras 9 y 10.

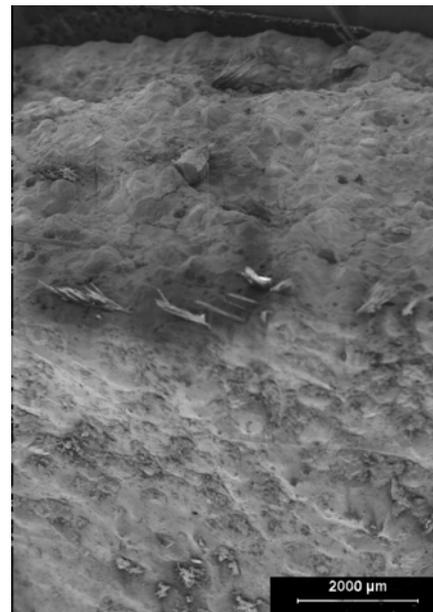


Figura 9. GRC envejecido 120 días con 4% resinas acrílicas

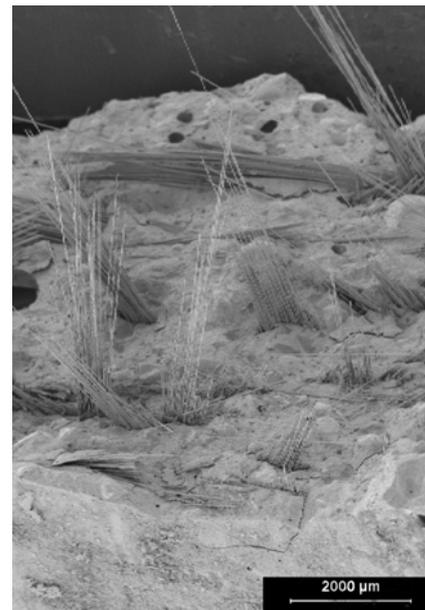


Figura 10. GRC envejecido 120 días con 10% metacaolín

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Las principales conclusiones que se pueden deducir de este estudio se resumen a continuación:

Los resultados que se han obtenido nos permiten asegurar que el metacaolín modifica la estructura del material aumentando el número de fibras arrancadas en un ensayo de tracción en material envejecido.

Las adiciones que se han utilizado tradicionalmente para mejorar el comportamiento del GRC (excepto el metacaolín) no producen diferencias notables en la fractografía del material.

El deterioro de las fibras se produce principalmente durante los primeros 11 años de vida del material.

Las superficies de fractura son más abruptas cuanto más joven es el material y dependen directamente del número de fibras que han sido extraídas del material.

Cuanto menor sea el número de fibras extraídas, la superficie de fractura será más plana y uniforme.

El trabajo futuro que se va a realizar para profundizar en las incógnitas pendientes incluye:

Realización de micrografías de los filamentos de las fibras en busca de evidencias de los procesos de corrosión y rotura en las fibras.

Fabricación de GRC con mayor contenido de metacaolín para corroborar la mejora de propiedades encontrada en este trabajo.

Correlacionar las micrografías con los resultados de los ensayos de tracción para intentar relacionar la microestructura con las propiedades mecánicas del material.

Estudio de posibles sistemas de auscultación que permitan predecir las zonas más débiles del material.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la financiación de este trabajo a través del proyecto BIA 2004-07336.

REFERENCIAS

- [1] L. Sánchez Paradela, V. Sánchez-Gálvez *Los cementos reforzados con fibras de vidrio*, Hormigón y Acero, V.173, 4º trimestre 1989, pp.113-126.
- [2] L. Sánchez Paradela, V. Sánchez-Gálvez. "Comportamiento a tracción de cementos reforzados con fibras de vidrio", Informes de la construcción, V.43, número 413, Mayo-Junio 1991 pp.77-89
- [3] B. Mobasher, , S.P. Shah, *ACI Mater. J.* 1989, nº 86 pp 448-458.
- [4] A.J. Majumdar, *Fibre reinforced cement and concrete*. Construction Press: Lancaster, PA (1975), pp 279-314.
- [5] S.P. Shah, D. Ludirdja, J.I: Daniel, B. Mobasher. *ACI Material Journal* (1988), número 85, pp. 352-360.
- [6] S.P. Shah, D. Ludirdja, J.I: Daniel. *Prestressed Concrete Inst.* (1987) numero 32, pp. 82-99.
- [7] Majumdar, A.J. y Laws, V. *Glass fibre reinforced cement*, BSP Professional Books, Oxford, 1991.
- [8] S. Marikunte. C. Aldea, S.P. Shah *Durability of Glass Fibre Reinforced Cement composites*. Advanced Cement Materials (1997), Vol 5. pp 100-108.
- [9] H.Ball, M. Wackers *Long term durability of naturally aged GFRC containing Forton polymer*. Proceedings Congreso GRC (2001). pp. 83-95
- [10] P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page, *Modeling durability in GRC*. Proceedings Congreso GRC (2001). pp. 73-82