v. 2, n. 22, 2022

Journal of
Engineering
Research

ESTUDIO A FLEXOTRACCIÓN EN PANELES DE FACHADA DE ELEMENTOS EN CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO GRC CON ADICIONES DE MATERIALES ALUMINO-SILÍCEOS Y POLÍMEROS

Rafael C. Gutierrez-Melgarejo
Department of Civil and Environmental Engineering, Universität Polytechnical of Catalunya, Edifice C1, despatcher 202E 08034 Barcelona
https://orcid.org/0000-0001-6379-5718

Ignacio Seguraa
Department of Civil and Environmental Engineering, Universität Polytechnical of Catalunya, Edifice C1, despatcher 202E 08034 Barcelona.

Carlos Jose Slebi
Centro de estudios Geotécnicos Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito Bloque I - 2do piso.

Andrea Cáceres Serrato
Programa de Ingeniería Civil Universidad Católica de Colombia Avda. Caracas # 46-72 Sede Las-Torres, Bloque H.

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).

Resumen: En el presente trabajo se explora la eficacia de algunos tipos de aditivos puzolanicos y resinas acrílicas en la mejora de las propiedades del GRC para evitar la pérdida de propiedades del material debido al envejecimiento. Para ello se fabrican probetas de GRC utilizando materiales locales mediante la técnica de proyección simultanea de fibras y mortero (método industrial de fabricación), Las muestras son envejecidas mediante dos técnicas de envejecimiento acelerado predictivo: cámara climática e inmersión en agua caliente. Cada tipo de muestra es sometida a ensayos de flexión para comprobar la eficacia de los aditivos respecto a las muestras de GRC envejecidas sin aditivos. Por otra parte, se analizan las muestras usando la técnica de micrografía para verificar la estructura de las fibras luego del proceso de envejecimiento acelerado.
Palabras Clave: Concreto reforzado con fibra de vidrio (GRC), Puzolanas, Resinas Acrílicas, Fibra de Vidrio, Durabilidad.

INTRODUCCIÓN

Los morteros de cementos reforzados con fibra de vidrio (GRC) son materiales con base cementicia que han sido utilizados en numerosas aplicaciones en la construcción durante los últimos 50 años (Anandaraj et al., 2019; Barbuta et al., 2017; Enfedaque et al., 2015a; Zhang et al., 1997) El material resulta atractivo en la construcción debido a sus propiedades mecánicas de alta resistencia a compresión, alta resistencia a tracción, ligereza y ductilidad, lo que lo convierte en un material idóneo y de alta proliferación en la industria de la construcción. Se ha utilizado en la construcción de fachadas, interiores, cubiertas, protección de tuberías, brazos de accesos para aviones en aeropuertos, revestimiento túneles y barreras acústicas(Ferreira & Branco, 2007; Guzlena & Sakale, 2021; Itterbeeck et al., 2009a, 2009b; Majumdar & Nurse, 1974; Park & Choi, 2018)

Diferentes autores (Barros Llerena et al., 1981; Fernández-Militino & Fernández Militino, 1996; Ferreira & Branco, 2007; Li et al., 2021; Park & Choi, 2018; Xu, 2012) han identificado una serie de beneficios y ventajas por las que se recomienda el uso del GRC en ciertos elementos de la construcción. Uno de los motivos es que existe una mayor relación resistencia entre resistencia y peso, ya que el GRC permite utilizar espesores pequeños que originan reducciones en peso de hasta un 86% frente a paneles de hormigón. Otra ventaja del GRC es que presenta gran resistencia al impacto, especialmente en edades tempranas y permite combinarse con otros materiales de núcleos para la formación de elementos tipo sándwich. Por ejemplo, permite adicionar materiales como perlita, vermiculita o cenizas volantes, las cuales unidas a fibras de vidrio generan productos resistentes al fuego. Por otra parte, el GRC facilita fabricar por proyección formas complicadas y permite cortarse o taladrarse de forma sencilla con herramientas simples permitiendo resolver incidencias en obra. En las figuras 1-3 se muestras las fachadas de diversos tipos de edificaciones en ciudades colombianas que incluyeron paneles de GRC.

A pesar de sus ventajas en el uso de la construcción, en numerosas investigaciones (Enfedaque et al., 2015b; Ferreira & Branco, 2007; Genovés et al., 2015; Purnell & Beddows, 2005a) se ha concluido que las propiedades mecánicas del GRC se deterioran con el paso del tiempo, fenómeno conocido como envejecimiento. Se produce una pérdida de ductilidad y perdida de resistencia a la tracción (Eiras et al., 2012; Enfedaque, Paradela, Sánchez-Gálvez, et al., 2012; Itterbeeck et al., 2009a; Li et al., 2021; *On Static and Dynamic Snap-Throughs of the Imperfect Post-Buckled FG-GRC Sandwich Beams - ScienceDirect*, n.d.) y surge una degradación

de las propiedades debido al ataque químico por los álcalis y el crecimiento de productos de hidratación del cemento, que aumentan la adherencia de la fibra matriz fragilizando el material (Proctor, 1990). Dentro del avance de la investigación se ha cualificado el referente del envejecimiento producido por exposición natural al medio ambiente del GRC en investigaciones realizadas por: (Enfedaque et al., 2015b; Ferreira & Branco, 2007; Genovés et al., 2015; Majumdar & Nurse, 1974; Purnell & Beddows, 2005a) En estas investigaciones se ha descubierto un envejecimiento que produce la fragilización del material generado por el ataque del álcali de cemento a la fibra de vidrio y el crecimiento de productos de hidratación en el cemento sobre las fibras, lo que genera el rompimiento de estas(Eiras, 2008; Enfedaque et al., 2017a; Litherland et al., 1981)

Por esta problemática se han desarrollado fibras de vidrio con composiciones más resistentes que prevengan la deformación y mitiguen el crecimiento por productos de hidratación además de algunos aditivos a la matriz que permitan disminuir el envejecimiento.

Otros intentos posteriores por solucionar el problema usaron otro tipo de enfoque, ya no mediante la mejora de la fibra, sino mejorando la matriz, mediante adiciones, ésta línea investigativa es la que inspira a la realización del presente estudio. En ensayos experimentales realizados en España, Estados Unidos & Reino Unido (Bartos & Zhu, 1996; Bentur & Mindess, 2020; Correia et al., 2006; Enfedaque, Paradela, & Sánchez-Gálvez, 2012a; Enfedaque et al., 2015b, 2015c, 2015d; Marikunte et al., 1997; Payakaniti et al., 2018; Sánchez Paradela & del Águila, 1992; Wang et al., 2021; Wen et al., 2019) en el campo de la investigación han aportado que la adición de puzolanas, tales como humo de sílice (SF), Cenizas volantes (FA), Metacaolín (MK) y tratamientos con polímeros acrílicos pueden mitigar el envejecimiento del GRC, sin embargo, estos programas experimentales dejan brechas en el conocimiento, ya que no definen ningún método, los resultados son diversos y dependientes de los programas experimentales propuestos y de los aditivos y mezclas que varían en su proporción.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

FORMULACIÓN DE LAS ADICIONES

En el proceso de formulación se contempló la inclusión de 5 adiciones y una muestra control, con polímeros al 1%, 2% y 3%, y puzolanas al 5% y 10%. Cabe señalar que se utilizó fibra de vidrio AR Cem-Fil 54. Las formulaciones utilizadas se basan en la industria y se muestran en la Tabla 1.

FABRICACIÓN DE PANELES Y PREPARACIÓN DE PROBETAS

Para la elaboración de esta actividad se consideraron los antecedentes, donde se indica que existen dos métodos para el desarrollo de la investigación, los cuales son: premezclado y proyección simultánea para la fabricación de probetas.

La fabricación del GRC se realiza mediante la proyección simultanea del mortero de cemento y de las fibras de vidrio. Las fibras de vidrio que se introducen en el material se encuentran formando bobinas. Una de estas bobinas se ve en la figura 4.

La proyección del GRC es mucho más complicada que la del mortero de cemento. Para lograr un buen resultado proyectando el mortero de cemento, sólo hay que asegurarse de que el molde queda totalmente lleno, ya que el material, si está bien mezclado, es homogéneo como se puede apreciar en la figura 5.

Para cada formulación se fabricaron paneles de 1.910 x 910 mm, con un espesor de 10 mm los cuales se cortaron de manera



Figura 1. Proyecto City U - Proyecto residencial. Bogotá – Colombia. Promotor U. Andes. Año 2015. Cantidad: 23.000m2



Figura 2. Proyecto Edificio Facultad de Artes U. Javeriana. Bogotá – Colombia. Año 2014 Área: 3.348m2



Figura 3. Velas Columbus. Cartagena Año: 2011. Área: 2,800 m2 de Fachadas. Tomado de Titán®.

	GRC 1 - Mezcla Control	GRC 2 - Polímero 1%	GRC 3 - Polímero 2%	GRC 4 - Polímero 3%	GRC 5 - Puzolana 5%	GRC 6 - Puzolana 10%
Material	**Dosificación en relación al peso del Cemento.**					
Cemento	1	1	1	1	0.95	0.95
MK					0.05	0.05
Arena Sílice	1	1	1	1	1	1
Agua	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Polímero	0	0.01	0.02	0.03	0	0
Plastificante	0.01	0.007	0.007	0.006	0.012	0.012
Aire	0	0	0	0	0	0
Roving Cem-Fil 54	0.118	0.11835	0.11885	0.1193	0.1181	0.1181

Tabla 1. Dosificación en relación al peso del Cemento.



Figura 4. Bobina de fibra de vidrio y pistola usada para la proyección del material. Tomado en Titán ® Planta Cota- Cundinamarca.



Figura 5. Proyección del GRC. Tomado en Titán ® Planta Cota- Cundinamarca.

industrial con una sierra circular, con el fin de obtener 60 probetas por formulación, con dimensiones aproximadas de 300 x 50 mm. Estas dimensiones se obtuvieron con base en los ensayos experimentales realizados por los siguientes autores:(Cheng et al., 2019; Eiras, 2008; Enfedaque et al., 2010, 2017a; Enfedaque, Paradela, Sánchez-Gálvez, et al., 2012; Sanchez & Ince, 2009)

Este proceso de fabricación es el llevado a cabo por los estándares de la industria de morteros reforzados con fibra de vidrio españoles según las normas UNE EN 1170:1998 y UNE EN 1169: 2000.

ENSAYOS DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS

Como se mencionó en los antecedentes uno de las problemáticas más importantes en el uso del GRC es el deterioro de las características mecánicas del material a lo largo del tiempo. Una forma de determinar ésta pérdida es comparar el GRC envejecido con el material joven. Por otra parte, la evaluación sobre el impacto de los aditivos en la mejora de las propiedades debe ser realizada usando un análisis a largo plazo. Una estrategia para realizar este análisis es mediante la evaluación por ensayos mecánicos, en especial el ensayo de flexión a 4 puntos.

Para este ensayo se usaron las probetas de GRC para todas las formulaciones propuestas de 300 x 30 mm de espesor 10 mm, las cuales se fallaron a ensayos a flexión en una máquina de ensayos universal mecánica Instron Ref. 2820-040 a 4, 28 días (GRC JOVEN) y una vez completaba el ciclo de envejecimiento acelerado recreado (GRC ENVEJECIDO) siguiendo la norma ASTM C947-2009. En la figura 7 se puede observar un esquema del ensayo realizado sobre el material joven.

ENVEJECIMIENTO ACELERADO

El envejecimiento del material se realizó mediante la inmersión en tanques de agua caliente a 50ºc. Esta hipótesis se ha comprobado al comparar ensayos realizados sobre el material envejecido aceleradamente en la investigación de Litherland et al. (1881) donde se determinó la equivalencia por inmersión de agua caliente en el envejecimiento natural y acelerado en el Reino Unido, conocido como la relación de Arrhenis. Ver tabla 2.

Recientemente, algunos autores han cuestionado la validez de los factores de aceleración de este trabajo para GRC fabricado con adiciones (Purnell & Beddows, 2005a) Dichos autores hallaron a su vez otros factores de aceleración, los cuales se muestran en la tabla 3, para agua a 50ºC. (Enfedaque, Paradela, & Sánchez-Gálvez, 2012b)

Algunos autores han señalado que, al aplicar el método por inmersión en agua caliente, algunas equivalencias no podrían ser válidas para las adiciones modernas de aditivos tales como humo de Sílice y Metacaolín. Esto se basa en que para pocas proporciones (Alrededor del 10% de cemento sustituido) la inmersión en agua caliente parece deteriorar las formulaciones dentro de la matriz del GRC (Enfedaque et al., 2011) Teniendo en cuenta la información de los artículos de investigación y otros estudios mencionados a lo largo de este trabajo, se consideró importante recrear envejecimiento mediante ciclos de humedecimiento y secado con temperatura constante. Método el cual según (Enfedaque et al., 2017b), parecen recrear de manera más precisa la simulación de las condiciones climáticas que producen el cambio de las propiedades mecánicas del GRC.

INMERSIÓN DE PROBETAS EN AGUA CALIENTE A 50ºC

Para el primer ambiente las probetas sumergidas en agua a 50ºc se fueron fallando por flexión en la máquina Instron Ref. 2820-



Figura 6. Corte de Probetas. Tomado en Planta Cota- Cundinamarca.



Figura 7. Montaje Ensayos a flexión sobre el material GRC Joven. Tomado en Planta Cota- Cundinamarca.

1 día a… 80°C	Días de Exposición en Reino Unido
70°C	1672
60°C	693
50°C	272
	101

Tabla 2. Equivalencia envejecimiento acelerado. Tomado de (Aindow et al., 1984; Enfedaque, Paradela, & Sánchez-Gálvez, 2012c; Purnell & Beddows, 2005b)

Factores de aceleración de 1 día de inmersión en agua caliente a 50°C	
	Días de exposición natural en UK
Cemento Portland ordinario GRC	**101**
Cemento Portland ordinario GRC + 20% metacaolín	**18**
Cemento Portland ordinario GRC + 5% Polímeros	**18**

Tabla 3. Equivalencia entre un día en agua a 50°C y el tiempo de exposición natural en el UK. (Enfedaque Díaz et al., 2010)

040 por ciclos de 5, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 80 y 90 días, siguiendo la norma ASTM C1560-2009. En la figura 8 se puede observar la inmersión de probetas realizadas en un equipo de inmersión de agua caliente en los laboratorios de ingeniería civil de la pontificia universidad javeriana donde por tuvieron alrededor de 180 placas de GRC sumergidas a 50ºc, fallando gradualmente 3 por adición de acuerdo a los ciclos ya mencionados.

INMERSIÓN DE PROBETAS EN AGUA CALIENTE A 50ºC

Para el segundo ambiente se recreó el envejecimiento del GRC, ciclos de humedecimiento y secado con temperatura constante. se realizó 6 ciclos en 24 horas en series de 30% a 95% de humedad. En la figura 9 se puede apreciar el montaje realizado en la cámara climática, los ciclos realizados fueron de 25, 50,100 y 200, donde una vez finalizado el ciclo se extraían las probetas referentes de la cámara climática y se procedían a realizar ensayos a flexión en 4 puntos como lo Indica la Norma ASTM-C947 (2009).

RESULTADOS

Dada la cantidad de ensayos a flexotracción realizados en la etapa experimental, se procedió a organizar los datos obtenidos en la maquina Instron Referencia 2820-040, lo cual arrojo una serie de datos conforme al desplazamiento en Milímetros (mm) y esfuerzo de flexión en Mega pascales (MPa), se grafican los resultados en una curva esfuerzo-desplazamiento, en la Figura 10 se observa la gráfica obtenida para las 3 probetas de polímero al 3% sometida a cámara climática

Los resultados de los ensayos a flexión sobre las probetas de GRC se determinan promedios de tres muestras por cada ensayo realizado a 28 días sin envejecer, Inmersión en Agua caliente a 50°C y 200 Ciclos de humedecimiento y secado, para los 5 tipos de adiciones y muestra control, a continuación, en las Figuras 11, 12 y 13 se aprecian los resultados del esfuerzo máximo a flexión (MOR) donde se evidencia la tensión máxima que puedo registrar la probeta antes de su ruptura.

Realizando el análisis de las GRC sin envejecer, se identifica que la adición de polímero al 2% y puzolana al 10%, no representan mejoras hacia la resistencia a flexotracción a los 28 días de fabricación del GRC, mientras que existe una notoria mejora para las adiciones de Polímero al 1%, Polímero al 3% y Puzolana al 5%, donde en un 36%, 32% y 30% en su orden, sobrepasan el esfuerzo obtenido en la muestra control con valores muy similares de 29.57, 28.72 y 28.42 MPa. Con el objetivo de determinar como la inclusión de puzolanas y resinas acrílicas influye sobre el desarrollo de las propiedades mecánicas del GRC se presentan a continuación los resultados de los ensayos realizados en flexión de 4 puntos para los ambientes de envejecimiento recreados para inmersión en agua caliente a 50°C para 50 días de inmersión y Cámara climática a temperatura de 20ºC y humedad entre 30 – 95% Para 200 ciclos.

Una vez envejecido el material a 50 días en inmersión en agua caliente a 50°C, lo que representa según Litherland et al. (1981) una edad equivalente a 14 años de exposición natural, se compara el su comportamiento de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo, resultando que para las adiciones de Polímero al 1% se presenta una disminución considerable de resistencia flexotracción de 20.16 MPa un 68% de disminución del valor presentado para el material Joven, en la gráfica resulta interesante apreciar que las adiciones de adición de polímero al 2% y puzolana al 10% a lo largo del tiempo recreado tienen una disminución menor en el orden de 8.84 MPa y 6.94 Mpa, por lo que se puede entender que



Figura 8. Inmersión de probetas en agua caliente a 50ºC. Tomado en la Pontificia Universidad Javeriana-Bogotá.



Figura 9. Ensayo en ciclos de temperatura constante de 20ºC y humedad entre 30% y 95%.

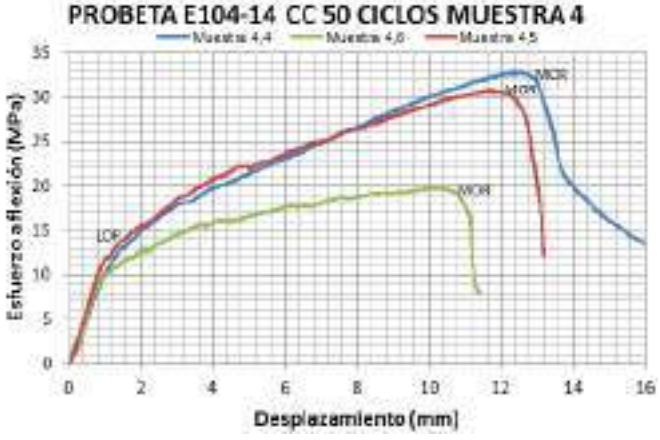


Figura 10. Grafica Esfuerzo-Desplazamiento, Ensayo GRC envejecido a 50 ciclos -Muestra 4.

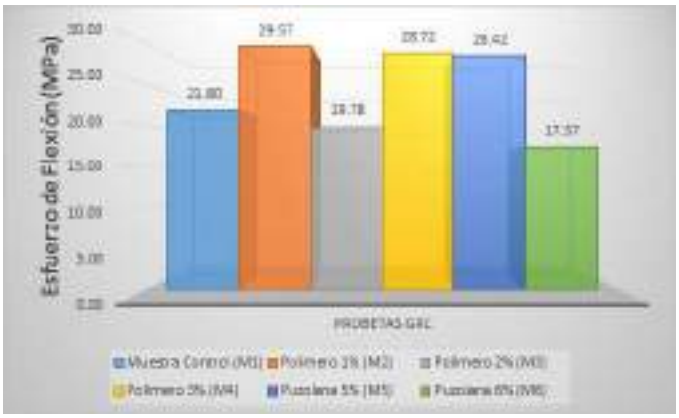


Figura 11. Resultados del MOR, Probetas de GRC sin envejecer a 28 días de fabricación.

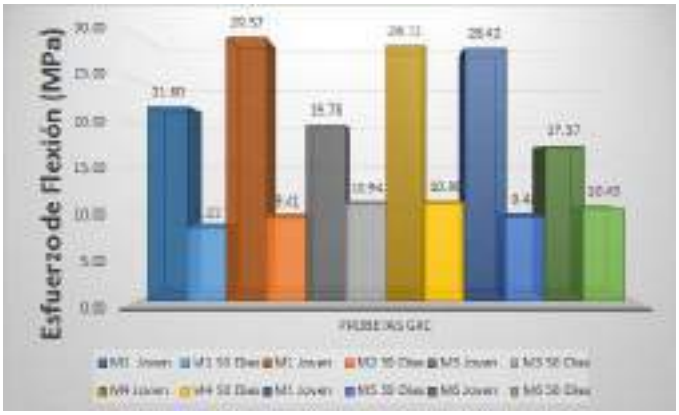


Figura 12. Resultados del MOR, probetas GRC a 50 días de inmersión en agua caliente a 50°C

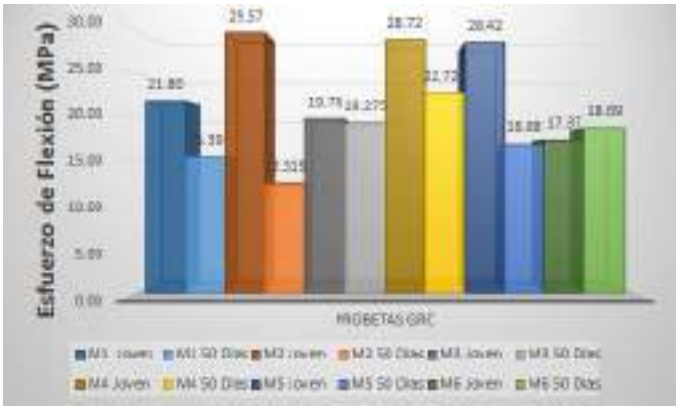


Figura 13. Resultados del MOR, Probetas de GRC a 200 ciclos de humedecimiento y secado.

se produce un efecto de mejora de resistencia lento pero eficaz, dado que la perdida de resistencia es mínima en futuros ensayos experimentales se proponen recrear ensayos a 90 y 120 días de inmersión. Al realizar la comparación de los valores obtenidos de resistencia a flexión de todas las adiciones propuestas se puede llegar a indicar que existe una mejora al utilizar adiciones de polímeros y puzolanas en la matriz del GRC.

En la Figura 13 se observa los resultados del esfuerzo máximo a flexión (MOR) de las Probetas de GRC a 200 ciclos de humedecimiento y secado. Para los 5 tipos de formulaciones propuestas y la muestra patrón, La mayor resistencia a flexión se presenta en la muestra con adición de resina al 3% con un valor de 22.72 MPa, estos valores sobrepasan un 48% el esfuerzo obtenido en la muestra sin adiciones, 85% el esfuerzo obtenido en la muestra con adición de polímero al 1%, 18% el esfuerzo obtenido en la muestra con adición de polímero al 2%, 35% el esfuerzo obtenido en la muestra con adición de puzolana al 5%, y 22% el esfuerzo obtenido en la muestra con adición de puzolana al 10%. Al realizar la comparación con el material joven se identifica un comportamiento similar de las adiciones de polímero al 2% y puzolana al 10% donde se produce la mínima reducción de la resistencia a flexotracción, e inclusive para la muestra con adición del 10% presenta una mejora atreves de los ciclos recreados por lo que se puede inferir que estas adiciones contribuyen en una mitigación del envejecimiento del GRC. Mientras que una muestra con adición del 1% de polímero su evolución atreves del tiempo no resulta ser favorable ya que si bien presenta los valores más altos de resistencia a flexotracción para el material joven al recrear envejecimiento acelerado su disminución es notoria alrededor del 58% con una diferencia de 29.57 Mpa a 12.32 Mpa.

Con el objetivo de mirar la evolución del comportamiento de las adiciones se presentan al igual sus curvas de esfuerzo – desplazamiento. ver Figuras 14,15 y 16.

MICROGRAFÍA DE LAS PROBETAS ENSAYADAS A FLEXIÓN

Con el ánimo de diferenciar los diferentes mecanismos de fractura que tienen lugar dúrate los ensayos a flexión del GRC y deducir qué ha ocurrido en el proceso de fractura durante el envejecimiento en los filamentos de la fibra de vidrio, se realiza una caracterización mediante microscopia electrónica de barrido con el equipo JEOL, modelo JSM 6490, así se aporta a comprender mejor los mecanismos de degradación de las fibras y apoya las conclusiones de los resultados de ensayos mecánicos.

Como se puede evidenciar en las fractografías del material joven (figuras 16 y 17) no se presentan grandes cantidades de fibras rotas ni fibras arrancadas. Por lo general se puede llegar a 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.

En la micrografía del material envejecido en inmersión en agua caliente a 50°C, Ver Figura 18. Se presenta una adición de partículas cementantes sobre la fibra que pueden conllevar a ataque por crecimiento de productos de hidratación, cortes por concentración de altos esfuerzos sobre las puntas de las fibras y uniformidad en la dirección de las fibras las cuales pierden su resistencia al no estar en bloque.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los avances de la tecnología y como la contribución que se está

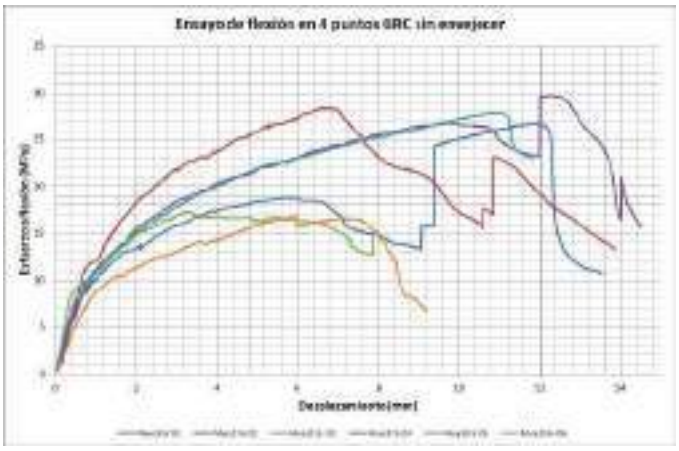


Figura 14. Resultado curva esfuerzo-desplazamiento inmersión en agua caliente a 50°C.

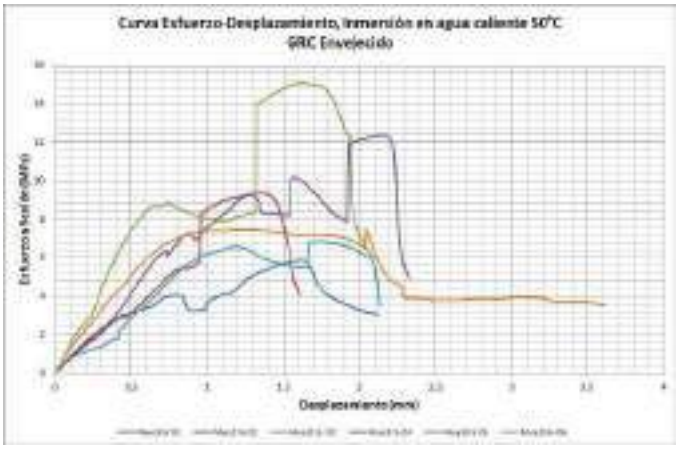


Figura 15. Resultado curva esfuerzo-desplazamiento inmersión en agua caliente a 50°C.

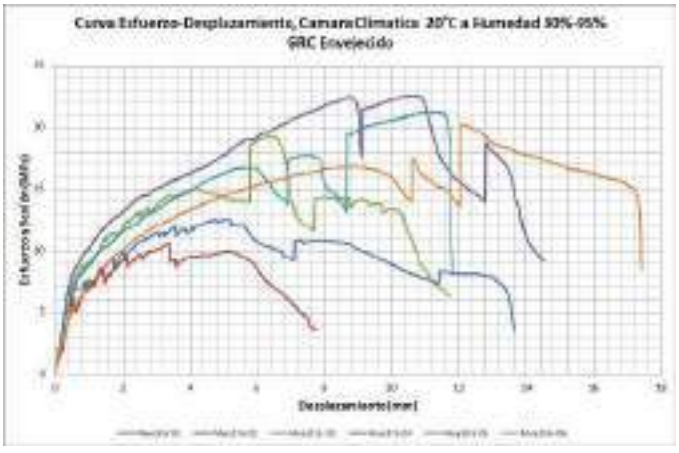


Figura 16. Resultado curva esfuerzo-desplazamiento inmersión en agua caliente a 50°C.

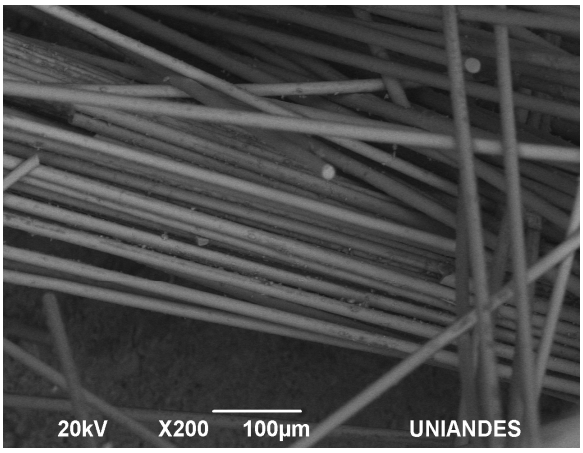


Figura 16. Micrografía del GRC sin envejecimiento.

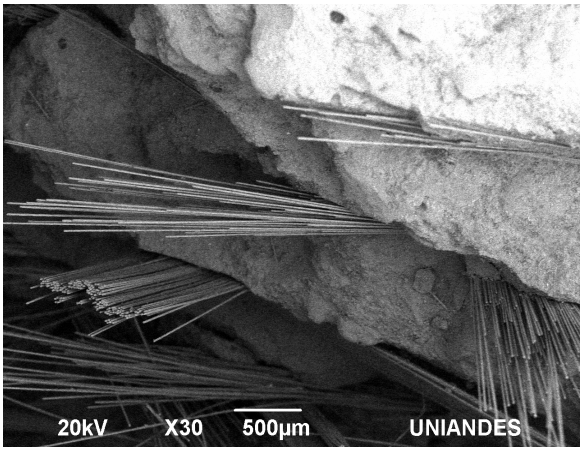


Figura 17. Micrografía del GRC sin envejecimiento.

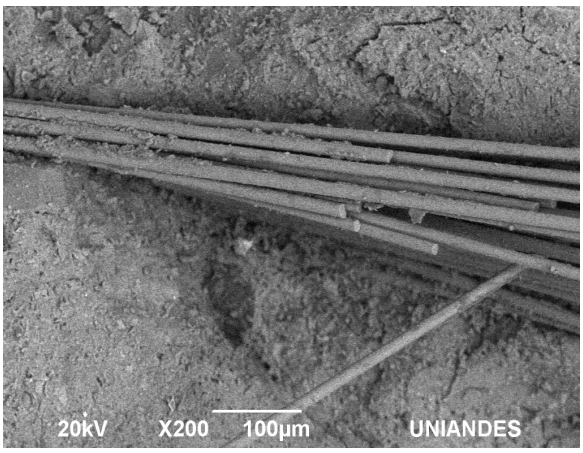


Figura 18. GRC envejecido en inmersión en agua caliente a 50ºC con puzolana al 10%.

generando en los países en pro del medio ambiente ha sido un auge para la nueva era de la construcción. Es importante destacar que por medio del GRC, permite abrir miras en el campo rural para apoyar actividades sociales, interculturales y económicas por medio de la contribución de la reducción de costos y si es preciso indicar para mejorar la técnica de construcción, mantenimiento y resistencia a cambios climáticos, propiedades modificadas y apalancamiento gubernamental, dentro de la investigación las principales conclusiones encontradas son:

En comparación con las muestras de GRC, las muestras de Polímeros tenían mayores valores de LOP y MOR. El concreto que es quebradizo se vuelve más flexible y susceptible a la deformación cuando se agregan polímeros a las muestras de PGRC.

Los dos métodos empleados recrean perdidas de propiedades mecánicas en el GRC, Inmersión en agua caliente a 50°C y ciclos de humedecimiento y secado, el método en cámara climática no tan severo como el de inmersión en agua, sin embargo, si comienza a mostrar una tendencia en el envejecimiento.

La inclusión de puzolanas y polímeros en la vinculación a la pasta de mortero contribuye al aumento de su resistencia a flexotracción.

En comparación con las muestras de GRC, las muestras de Polímeros tenían mayores valores de LOP y MOR. El concreto que es quebradizo se vuelve más flexible y susceptible a la deformación cuando se agregan polímeros a las muestras de PGRC.

La inclusión de puzolanas al 10% y polímeros al 2% en la vinculación a la pasta de mortero contribuye al aumento de su resistencia a flexotracción a través de los ambientes recreados mitigando el envejecimiento.

Una adición de polímero al 1 % sobre las muestras de GRC, aunque a una edad joven es efectiva no representan mejoras en el material al recrear ensayos de envejecimiento acelerado.

REFERENCIAS

Aindow, A. J., Oakley, D. R., & Proctor, B. A. (1984). Comparison of the weathering behaviour of GRC with predictions made from accelerated ageing tests. *Cement and Concrete Research*, *14*(2), 271–274. https://doi.org/10.1016/0008-8846(84)90114-5

Anandaraj, S., Rooby, J., Awoyera, P. O., & Gobinath, R. (2019). Structural distress in glass fibre-reinforced concrete under loading and exposure to aggressive environments. *Construction and Building Materials*, *197*, 862–870. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.090

Barbuta, M., Bucur, R., Serbanoiu, A. A., Scutarasu, S., & Burlacu, A. (2017). Combined Effect of Fly Ash and Fibers on Properties of Cement Concrete. *Procedia Engineering*, *181*, 280–284. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.390

Barros Llerena, Á., Caballero, J. M., & Zaldo, V. (1981). Aplicaciones del cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC). *Informes de La Construcción*, *33*(333-334-335–336), 73–81. https://doi.org/10.3989/ic.1981.v33.i333-334-335-336.2196

Bartos, P. J. M., & Zhu, W. (1996). Effect of microsilica and acrylic polymer treatment on the ageing of GRC. *Cement and Concrete Composites*, *18*(1), 31–39. https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00041-0

Bentur, A., & Mindess, S. (2020). Introduction. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, 21–30. https://doi.org/10.1201/9781482267747-8

Cheng, C., He, J., Zhang, J., & Yang, Y. (2019). Study on the time-dependent mechanical properties of glass fiber reinforced cement (GRC) with fly ash or slag. *Construction and Building Materials*, *217*, 128–136. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.05.063

Correia, J. R., Ferreira, J., & Branco, F. A. (2006). A rehabilitation study of sandwich GRC facade panels. *Construction and Building Materials*, *20*(8), 554–561. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.066

Eiras, J. N. (2008). *Efecto de la adicion de puzolanas activas en la durabilidad del GRC fabricado con fibras de vidrio tipo E*. 53.

Eiras, J. N., Gaona, F., Monzó, J., Kundu, T., Popovics, J. S., Payá, J., & Bonilla, M. (2012). Caracterización de GRC y evaluación del proceso de envejecimiento por medio del análisis de espectros de vibración. *XIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, PMS2012*, *SEPTEMBER*, 1–6.

Enfedaque, A., Alberti, M. G., Gálvez, J. C., & Domingo, J. (2017a). Numerical simulation of the fracture behaviour of glass fibre reinforced cement. *Construction and Building Materials*, *136*, 108–117. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.130

Enfedaque, A., Alberti, M. G., Gálvez, J. C., & Domingo, J. (2017b). Numerical simulation of the fracture behaviour of glass fibre reinforced cement. *Construction and Building Materials*, *136*, 108–117. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.130

Enfedaque, A., Cendón, D., Gálvez, F., & Sánchez-Gálvez, V. (2010). Analysis of glass fiber reinforced cement (GRC) fracture surfaces. *Construction and Building Materials*, *24*(7), 1302–1308. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.005

Enfedaque, A., Cendón, D., Gálvez, F., & Sánchez-Gálvez, V. (2011). Failure and impact behavior of facade panels made of glass fiber reinforced cement(GRC). *Engineering Failure Analysis*, *18*(7), 1652–1663. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.01.004

Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Suárez, F. (2015a). Analysis of fracture tests of glass fibre reinforced cement (GRC) using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, *75*, 472–487. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.031

Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Suárez, F. (2015b). Analysis of fracture tests of glass fibre reinforced cement (GRC) using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, *75*, 472–487. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.031

Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Suárez, F. (2015c). Analysis of fracture tests of glass fibre reinforced cement (GRC) using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, *75*, 472–487. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.031

Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Suárez, F. (2015d). Analysis of fracture tests of glass fibre reinforced cement (GRC) using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, *75*, 472–487. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.031

Enfedaque, A., Paradela, L. S., & Sánchez-Gálvez, V. (2012a). An alternative methodology to predict aging effects on the mechanical properties of glass fiber reinforced cements (GRC). *Construction and Building Materials*, *27*(1), 425–431. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.025

Enfedaque, A., Paradela, L. S., & Sánchez-Gálvez, V. (2012b). An alternative methodology to predict aging effects on the mechanical properties of glass fiber reinforced cements (GRC). *Construction and Building Materials*, *27*(1), 425–431. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.025

Enfedaque, A., Paradela, L. S., & Sánchez-Gálvez, V. (2012c). An alternative methodology to predict aging effects on the mechanical properties of glass fiber reinforced cements (GRC). *Construction and Building Materials*, *27*(1), 425–431. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.07.025

Enfedaque, A., Paradela, L. S., Sánchez-Gálvez, V., Sánchez Paradela, M. L., del Águila, A., Rodríguez Santiago, J., Jordán Reyes, M., Eiras, J. N., Kundu, T., Bonilla, M., Payá, J., Barros Llerena, Á., Caballero, J. M., Zaldo, V., Beltr, A., Garc, E. G., Arquitectura, M., Pastr, C., Enfedaque, A., … Richardson, I. (2012). An alternative methodology to predict aging effects on the mechanical properties of glass fiber reinforced cements (GRC). *Construction and Building Materials*, *27*(1), 425–431. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.025

Enfedaque Díaz, A., Sánchez Paradela, L., & Sánchez-Gálvez, V. (2010). El efecto del humo de sílice y el metacaolín en el proceso de envejecimiento de los morteros de cemento reforzados con fibras de vidrio (GRC). *Materiales de Construccion*, *60*(300), 67–82. https://doi.org/10.3989/mc.2010.52009

Fernández-Militino, J., & Fernández Militino, J. (1996). GRC en fachadas: el material y sus aplicaciones. *RE: Revista de Edificación*, *22*, 37–42.

Ferreira, J. G., & Branco, F. A. (2007). Structural application of GRC in telecommunication towers. *Construction and Building Materials*, *21*(1), 19–28. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.003

Genovés, V., Gosálbez, J., Miralles, R., Bonilla, M., & Payá, J. (2015). Ultrasonic characterization of GRC with high percentage of fly ash substitution. *Ultrasonics*, *60*, 88–95. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.02.016

Guzlena, S., & Sakale, G. (2021). Self-healing of glass fibre reinforced concrete (GRC) and polymer glass fibre reinforced concrete (PGRC) using crystalline admixtures. *Construction and Building Materials*, *267*, 120963. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120963

Itterbeeck, P. van, Purnell, P., Cuypers, H., & Wastiels, J. (2009a). Study of strength durability models for GRC: Theoretical overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *40*(12), 2020–2030. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.010

Itterbeeck, P. van, Purnell, P., Cuypers, H., & Wastiels, J. (2009b). Study of strength durability models for GRC: Theoretical overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *40*(12), 2020–2030. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.010

Li, C., Shen, H. S., Yang, J., & Wang, H. (2021). Low-velocity impact response of sandwich plates with GRC face sheets and FG auxetic 3D lattice cores. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, *132*, 335–344. https://doi.org/10.1016/J.ENGANABOUND.2021.08.002

Litherland, K. L., Oakley, D. R., & Proctor, B. A. (1981). The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites. *Cement and Concrete Research*, *11*(3), 455–466. https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90117-4

Majumdar, A. J., & Nurse, R. W. (1974). Glass fibre reinforced cement. In *Materials Science and Engineering* (Vol. 15, Issues 2–3, pp. 107–127). https://doi.org/10.1016/0025-5416(74)90043-3

Marikunte, S., Aldea, C., & Shah, S. P. (1997). Durability of glass fiber reinforced cement composites: *Advanced Cement Based Materials*, *5*(3–4), 100–108. https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00003-5

On static and dynamic snap-throughs of the imperfect post-buckled FG-GRC sandwich beams - ScienceDirect. (n.d.). Retrieved January 16, 2021, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X20305149

Park, B., & Choi, Y. C. (2018). Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs). *Construction and Building Materials*, *189*, 1054–1066. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.061

Payakaniti, P., Pinitsoonthorn, S., Thongbai, P., Amornkitbamrung, V., & Chindaprasirt, P. (2018). Effects of carbon fiber on mechanical and electrical properties of fly ash geopolymer composite. *Materials Today: Proceedings*, *5*(6), 14017–14025. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.054

Purnell, P., & Beddows, J. (2005a). Durability and simulated ageing of new matrix glass fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, *27*(9–10), 875–884. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.04.002

Purnell, P., & Beddows, J. (2005b). Durability and simulated ageing of new matrix glass fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, *27*(9–10), 875–884. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2005.04.002

Sanchez, F., & Ince, C. (2009). Microstructure and macroscopic properties of hybrid carbon nanofiber/silica fume cement composites. *Composites Science and Technology*, *69*(7–8), 1310–1318. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.03.006

Sánchez Paradela, M. L., & del Águila, A. (1992). El envejecimiento de las pastas de cemento reforzadas con fibras de vidrio. *Materiales de Construcción*, *42*(226), 65–71. https://doi.org/10.3989/mc.1992.v42.i226.712

Wang, Z., Xu, J., Nie, L., Xia, W., Huang, Z., & Meng, X. (2021). Effect of Test Voltage and Age on the Resistivity of Carbon Fiber Reinforced Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *719*(2). https://doi.org/10.1088/1755-1315/719/2/022069

Wen, Z., Qian, X., Zhang, Y., Wang, X., Wang, W., & Song, S. (2019). Electrochemical polymerization of carbon fibers and its effect on the interfacial properties of carbon reinforced epoxy resin composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *119*, 21–29. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.01.014

Xu, X. (2012). Game of the truel. *Synthese*, *185*(SUPPL. 1), 19–25. https://doi.org/10.1007/s11229-011-9956-y

Zhang, Y., Sun, W., Shang, L., & Pan, G. (1997). Effect of high content of fly ash on the properties of glass fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, *27*(12), 1885–1891. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00203-2