

Caracterización mecánica de morteros reforzados con textiles para el refuerzo de estructuras de hormigón.

Mechanical Characterization of Textile-Reinforced Mortars for Strengthening Concrete Structures

Kevin Isaac Escobar^a, Juan Murcia-Delso^b, Eva Oller^c

^a PhD candidate. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). kevin.isaac.escobar@upc.edu

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). juan.murcia-delso@upc.edu

^c Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). eva.oller@upc.edu

RESUMEN

Las estructuras de hormigón armado y pretensado a menudo requieren reparación o refuerzo debido a la corrosión. Los morteros reforzados con textiles (TRM) son una opción prometedora para restaurar y mejorar la capacidad portante de este tipo de estructuras. El presente estudio evalúa las propiedades de tracción y adherencia de varios sistemas de TRM que incluyen textiles de carbono, basalto y cáñamo. Los resultados experimentales indican que el recubrimiento con resina epoxi mejora la adherencia y la resistencia a tracción de las fibras previniendo fallas telescópicas. La configuración de ensayo y el tipo de mortero utilizado afectan el patrón de fisuración y la capacidad de deformación.

ABSTRACT

Reinforced and prestressed concrete structures often require repair or strengthening due to corrosion. Textile-reinforced mortars (TRM) are a promising solution to restoring and enhancing the bearing capacity of these structures. This study evaluates the tensile and bond properties of various TRM systems that include carbon, basalt, and hemp textiles. Uniaxial tensile and single lap shear tests were conducted. The experimental results show that applying an epoxy resin coating improves the bond and tensile strength of the fibres preventing telescopic failures. Both the test configuration and the type of mortar are found to influence the cracking pattern and the deformation capacity.

PALABRAS CLAVE: Morteros reforzados con textiles, carbono, basalto, fibras naturales, características mecánicas.

KEYWORDS: Textile reinforced mortar, carbon, basalt, natural fibres, mechanical properties.

1. Introducción

Muchas estructuras de hormigón armado y pretensado existentes están llegando al final de su vida útil y requieren reparación o refuerzo debido al deterioro por corrosión y otras patologías. El cambio climático puede empeorar esta situación incrementando ciertos tipos de cargas y el riesgo de corrosión. En las últimas décadas, han surgido diversas estrategias para reforzar estas estructuras. Los polímeros reforzados con fibras (FRP) han sido populares

para la rehabilitación y refuerzo de estructuras dañadas debido a su alta relación resistencia-peso. Sin embargo, inconvenientes como el bajo rendimiento a elevadas temperaturas, posibles desprendimientos prematuros y problemas de compatibilidad con el sustrato limitan su efectividad, principalmente debido al uso de matrices orgánicas [1–3].

Los morteros reforzados con textiles (TRM) abordan algunas de estas desventajas

reemplazando la matriz orgánica por una inorgánica cementicia, lo que mejora la resistencia al fuego y la compatibilidad con el sustrato [4,5]. Los sistemas de TRM consisten en textiles de refuerzo embebidos en una matriz de mortero, a diferencia del FRP se utilizan textiles de malla abierta para facilitar la penetración del mortero. Los textiles comúnmente utilizados incluyen fibras de carbono, vidrio y basalto debido a su alta resistencia y durabilidad [6–8]. Existe también un creciente interés en el uso de mallas de fibras naturales debido a su mejor cumplimiento con los requisitos de sostenibilidad. Las fibras naturales, como el cáñamo, el yute y el lino, ofrecen beneficios ambientales como menor energía incorporada y huella de carbono [9,10]. Aunque los textiles naturales pueden presentar desafíos de durabilidad y no han sido ampliamente estudiados, los sistemas TRM naturales han demostrado buena capacidad para restaurar y reforzar efectivamente estructuras de obra de fábrica y edificios históricos [11–13].

La adherencia entre la matriz y el textil juega un papel crucial en la determinación del rendimiento global de los compuestos de TRM. Es esencial que el mortero se infiltre completamente entre cada filamento de las fibras para garantizar una unión uniforme. Recubrir las fibras con resina aborda este problema y ha demostrado aumentar la resistencia a tracción y la rigidez de diversas configuraciones de TRM [8,14]. La unión mecánica entre las fibras y el mortero está influenciada por la estructura del textil, incluyendo la presencia de recubrimiento, el tamaño de la malla y las propiedades del tejido. Dado que los compuestos TRM trabajan principalmente bajo tracción, su rendimiento se evalúa típicamente mediante ensayos de tracción uniaxial de probetas de este material compuesto. En un ensayo de tracción de TRM se identifican típicamente tres etapas principales. Inicialmente, el material exhibe un comportamiento elástico lineal dominado por el mortero hasta que se alcanza su resistencia a la tracción y aparece la

primera fisura. Posteriormente, se presenta la segunda etapa en la que se generan más fisuras conocida como fase de saturación. En esta fase el textil comienza a contribuir significativamente a la resistencia, distribuyendo tensiones y limitando la apertura de fisuras. Finalmente, una vez generadas todas las fisuras el textil toma un rol dominante hasta alcanzar su resistencia máxima. Los ensayos de tracción se realizan a menudo con una configuración de sujeción de horquilla [15] o mediante un método de abrazadera con presión transversal [16]. Además, el comportamiento de adherencia entre el TRM y el sustrato de hormigón se evalúa comúnmente mediante ensayos de solape simple o doble [17,18].

Este artículo presenta un estudio experimental sobre los comportamientos de tracción y adherencia de varios sistemas TRM que incorporan textiles de alta resistencia de carbono y basalto, así como fibras naturales de cáñamo, combinados con diferentes tipos de morteros. El estudio incluye ensayos de tracción uniaxial utilizando métodos de sujeción de horquilla y de abrazadera, así como ensayos de adherencia utilizando una configuración de solape simple. Se analizan y discuten los efectos de la composición de la matriz, la configuración de ensayo en el patrón de fisuración y la respuesta tensión-deformación a tracción.

2. Programa experimental

2.1 Materiales

Se investigaron tres tipos de textiles: a) carbono, utilizando la malla comercial bidireccional Mapegrid C200 y que se ha estudiado con una impregnación de resina látex (CL) y con otra impregnación de resina epoxi (CE); b) basalto, utilizando la malla comercial bidireccional Mapegrid B250 impregnada con resina acrílica (BA); y c) malla de cáñamo impregnada con resina epoxi (HE). Las propiedades de los

textiles con valores promedios se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los textiles en dirección de carga

Notación	σ_f (N/mm ²)	ε_f (%)
CL	2015	1.13
CE	2909	1.54
BA	1588	2.05
HE	834	1.13

Las áreas de la sección transversal de las mallas de carbono y basalto son 55.00 mm²/m y 38.91 mm²/m respectivamente, proporcionadas por el fabricante. La malla de cáñamo, conformada por hilos de 0,40 mm de diámetro agrupados en haces de 6 hiladas en la dirección de carga, tiene un área transversal de 37.69 mm²/m. Las dimensiones de las mallas se pueden observar en la Figura 1.

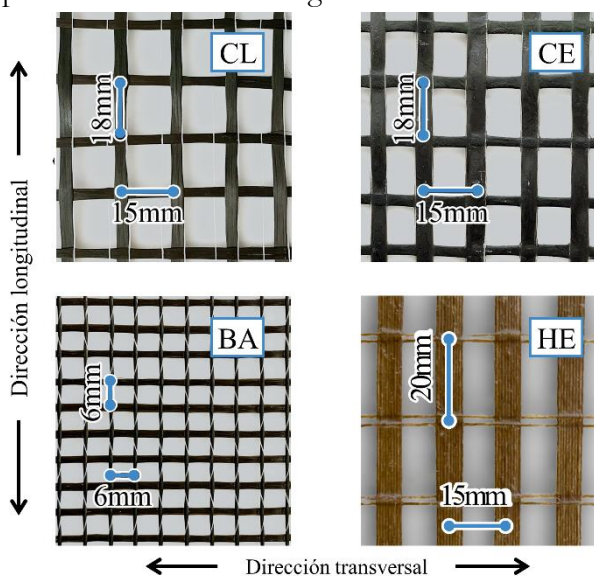


Figura 1. Dimensiones de textiles empleados.

Se seleccionaron tres tipos de morteros: mortero de cemento convencional (C), mortero comercial Planitop HDM Maxi con fibras cortas de vidrio (P), y el mortero comercial Mapegrout 430 Zero con fibras sintéticas (Z). Las propiedades mecánicas de los morteros se determinaron mediante ensayos de flexión y compresión de acuerdo con la norma EN 1015-11 [19]. Para la caracterización del hormigón

(CR) de los ensayos de adherencia, se prepararon tres cilindros para obtener la resistencia a la compresión del hormigón siguiendo la norma europea EN 12390-3 [20]. Los resultados promedios se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de los morteros y hormigón empleados

Notación	σ_{fm} (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)
C	9.00	48.23
P	8.25	34.25
Z	7.95	53.40
CR	-	31.35

2.2 Configuraciones de ensayo

2.2.1. Ensayos a tracción

Para los ensayos de tracción, se prepararon especímenes con dimensiones nominales de 600 mm de longitud, 60 mm de ancho y 10 mm de espesor. Los especímenes de TRM se fabricaron utilizando moldes de madera o fenólicos. Se realizaron ensayos de tracción uniaxial utilizando dos métodos de sujeción. El primer método denominado sujeción de horquilla, consiste en adherir chapas metálicas en cada extremo de los especímenes con resina epoxi y mediante grilletes aplicar la carga. Se utilizó una longitud de adherencia de 100 mm para la mayoría de los especímenes, excepto para aquellos con textil de carbono impregnado con resina epoxi, donde se utilizó 200 mm. El segundo método denominado de sujeción con abrazaderas consiste en placas metálicas atornilladas con una lámina de goma entre ellas para transferir la carga por fricción. La longitud de sujeción fue de 170 mm. Los ensayos se realizaron bajo control de desplazamiento a una velocidad de 0.20 mm/min. Se montaron dos transductores de desplazamiento lineal variable (LVDTs) en cada espécimen con una longitud de referencia de 200 mm para medir las deformaciones. Las configuraciones de ambos métodos pueden observarse en la Figura 2.

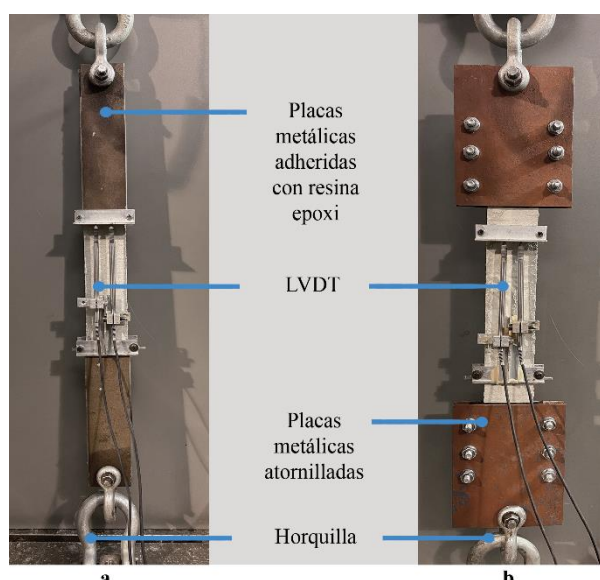


Figura 2. Configuraciones de ensayos a tracción: (a) horquilla, y (b) abrazaderas.

2.2.2. Ensayo de adherencia

Para los ensayos de adherencia, los especímenes de TRM se prepararon sobre prismas de hormigón utilizando diferentes longitudes de nominales de adherencia (200 mm, 300 mm y 400 mm) y un ancho nominal de 60 mm. Se utilizó una configuración de ensayo de solape simple. Se utilizaron dos LVDTs para medir el desplazamiento (deslizamiento global) entre el TRM y el hormigón. La disposición de los ensayos de adherencia se muestra en la Figura 3.

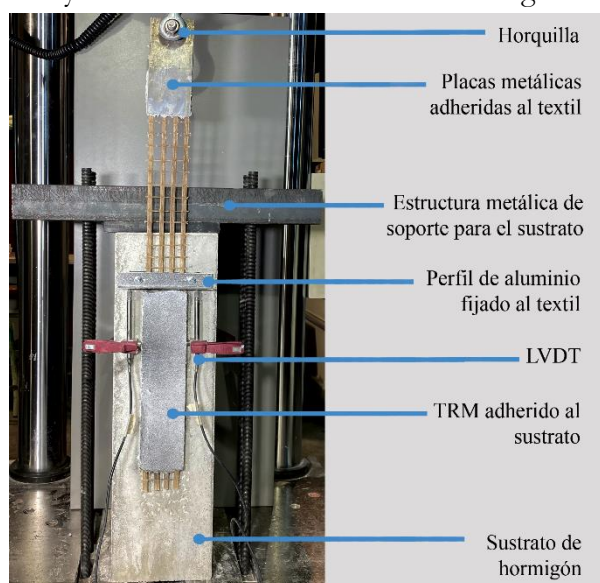


Figura 3. Configuración de ensayos de adherencia.

3. Resultados y discusión

3.1. Comportamiento a tracción

Se ensayaron a tracción un mínimo de cinco especímenes por cada combinación de textil y mortero. Las tensiones se calcularon dividiendo la carga aplicada por el área transversal nominal de las fibras. Comparando las gráficas de tensión-deformación según la configuración de ensayo, se ha observado un comportamiento similar entre el ensayo de horquilla y el ensayo con abrazaderas cuando el modo de fallo del TRM está controlado por la rotura del textil y existe buena adherencia entre la malla y la matriz, como ocurre con los textiles BA, HE (ver Figura 4) y CE.

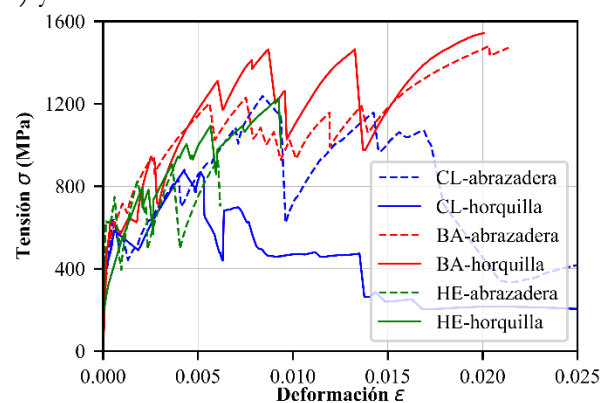


Figura 4. Comparación de resultados entre configuraciones de ensayos a tracción para diferentes textiles con mortero convencional.

Se ha observado una influencia del método de ensayo en la fisuración de las probetas, presentando un patrón de fisuras más saturado en algunas combinaciones de TRM y afectando así la deformación última alcanzada mas no la carga última. Los especímenes con textil de carbono recubierto con resina látex CL, exhibieron roturas prematuras antes de alcanzar la resistencia a tracción del textil. Este comportamiento se debió a un modo de fallo conocido como falla telescópica, en el cual se observa un deslizamiento progresivo entre el refuerzo textil y la matriz como se muestra en la Figura 5. Este fenómeno se atribuye a la incapacidad del mortero de penetrar completamente entre las fibras del textil, comprometiendo así la transferencia efectiva de

esfuerzos entre ambos materiales. Cuando los filamentos que se adhieren bien al mortero rompen, empiezan a deslizarse los que no han sido impregnados por el mortero dejando una resistencia remanente de fricción como se observa en la Figura 6.

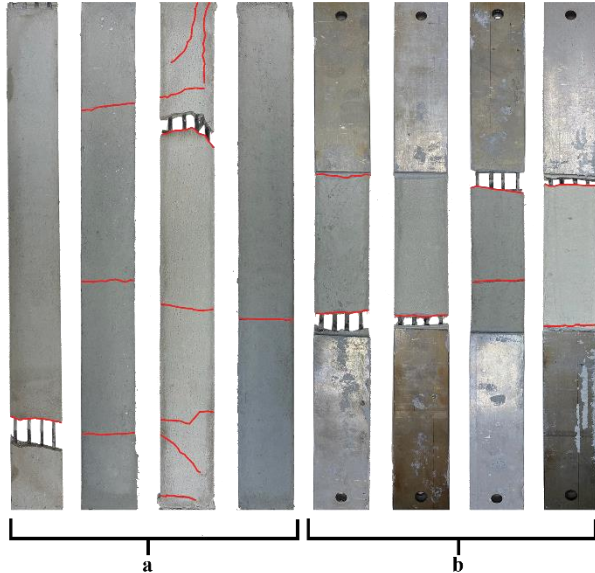


Figura 5. Patrón de fisuras y modo de fallo usando textil CL, según la configuración de ensayo: (a) Abrazaderas, y (b) horquilla.

Para los especímenes con CL la configuración de abrazadera retrasó un poco la falla telescópica debido a la presión transversal ejercida en los extremos de los especímenes, permitiendo llegar a una carga mayor pero eventualmente el deslizamiento entre la malla y el mortero siempre ocurre. Sin embargo, varias probetas ensayadas con el método de abrazadera presentaron fisuración en la zona de anclaje y algunas fallaron en dicha zona. Además, en

algunos casos la lámina de goma colocada entre los especímenes y las placas metálicas presentó deslizamiento. Para evitar estos inconvenientes, en las demás combinaciones de TRM se ha empleado el método de horquilla. Las respuestas tensión-deformación de cada composición de TRM se presentan en las Figuras 6 y 7. El uso de resina epoxi en el textil de carbono CE mejoró significativamente el rendimiento de los compuestos TRM en comparación con el recubrimiento con resina de látex como se observa en la Figura 6. La resina epoxi ayuda a distribuir mejor la carga entre los filamentos y previene la falla telescópica, obteniendo un modo de fallo por rotura de fibras. Los especímenes alcanzaron resistencias a tracción superiores a la resistencia del textil. Se obtuvo un patrón de fisuración más saturado, demostrando una mejor compatibilidad y capacidad de distribución de cargas entre la matriz y el textil. Aunque usando textil CE se pueden obtener las tres etapas principales del compuesto, se puede representar el comportamiento del TRM usando un modelo bilineal ya que la etapa de saturación de fisuras finaliza rápidamente a un nivel bajo de carga (Ver Figura 6a). Cuando se emplea un mortero con fibras cortas de vidrio, estas últimas forman un efecto puente que retarda la aparición de nuevas fisuras y previene la apertura de las ya existentes. Esto genera una etapa de saturación más extendida en la curva tensión-deformación.

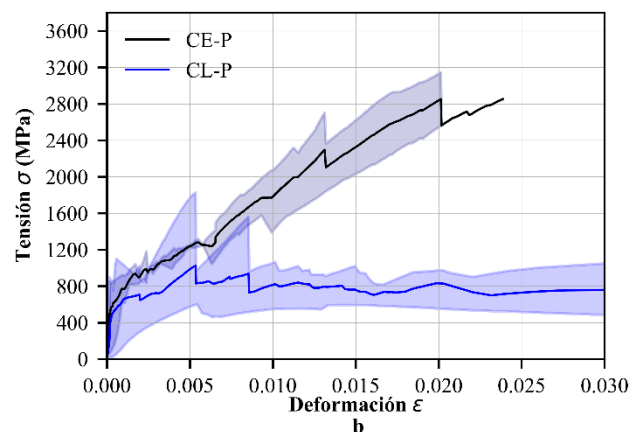
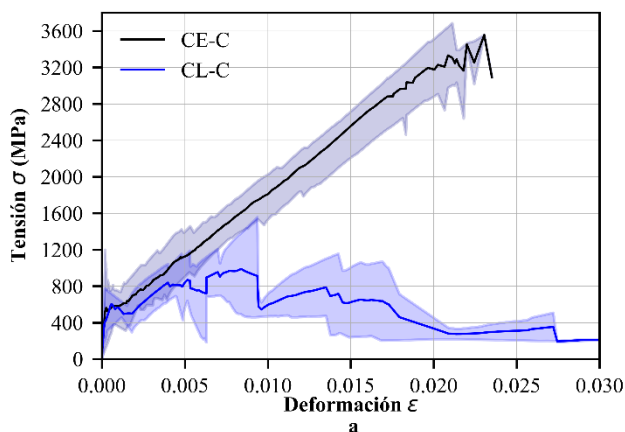


Figura 6. Gráfica tensión-deformación de TRM usando textil CL y CE con: (a) mortero convencional, y (b) mortero con fibras cortas de vidrio.

Los especímenes que emplearon textil de basalto recubierto con resina acrílica BA y textil de cáñamo con resina epoxi HE, alcanzaron mayores deformaciones cuando se combinaron con mortero convencional (Figura 7). Esto fue debido a que presentaron un patrón de fisuración más saturado. Los morteros con fibras cortas de vidrio y fibras sintéticas permitieron alcanzar la resistencia máxima del textil, pero limitaron su deformación. El modo de fallo observado en todos los casos fue rotura de fibras de la malla. En contraste con el TRM empleando textil CE, los textiles de BA y HE presentan resistencias a tracción más cercanas a las de los

morteros utilizados. Esto provoca que después de la aparición de la primera fisura, exista menos margen en el incremento de la carga antes de la rotura de las fibras y por tanto no exista una distinción clara entre la fase de saturación y la tercera etapa del compuesto. Los comportamientos de los TRM con textiles BA y HE pueden representarse utilizando un modelo bilineal. El recubrimiento de resina epoxi ayudó en la distribución de tensiones entre los hilos de cáñamo y mejoró la adherencia entre el textil y la matriz.

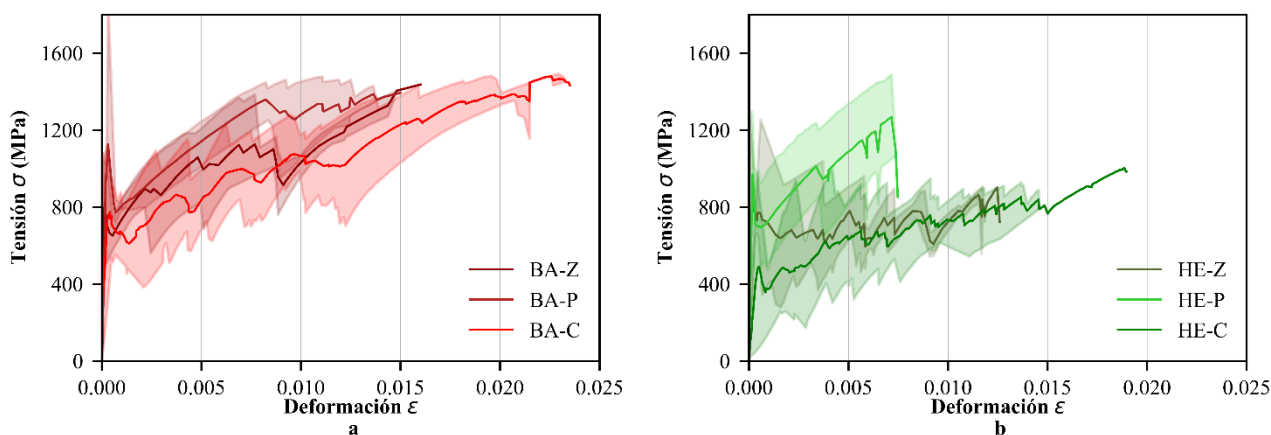


Figura 7. Gráfica tensión-deformación de TRM utilizando diferentes tipos de mortero con: (a) textil BA, y (b) textil HE.

3.2. Comportamiento de la adherencia

Para los ensayos de adherencia se prepararon tres especímenes para cada longitud de adherencia según cada combinación de textil y mortero utilizada. Todos los especímenes presentaron deslizamiento entre las fibras y el mortero o una combinación de deslizamiento y rotura de fibras. El deslizamiento medido ocurrió principalmente en la interfaz textil-matriz. Durante los ensayos, no se observaron fisuras transversales en la matriz para los compuestos por textil de BA y CL, pero si en los especímenes con recubrimientos epoxi en la malla. Los especímenes con textil de carbono

recubierto con resina de látex y mortero con fibras cortas de vidrio presentaron deslizamiento completo de las fibras sin rotura en todas las longitudes de adherencia menores a 200 mm. Se observó una resistencia de fricción residual mientras se extraían los filamentos internos de los haces similar al obtenido de los ensayos de tracción por falla telescópica. El análisis de la matriz después de las pruebas mostró que algunos filamentos externos se rompieron dentro del mortero. El número de filamentos y el espaciamiento entre haces pueden influir significativamente en la prevalencia del deslizamiento total del textil, ya que un mayor número de filamentos en un hilo disminuye la

proporción entre los filamentos en contacto con la matriz y los filamentos internos. Para longitudes de adherencia superiores a 300 mm, ocurrió un deslizamiento inicial seguido de una rotura progresiva de las fibras, y se logró una falla completa y simultánea del textil fuera de la banda de TRM utilizando una longitud de adherencia de 450mm. El aumento de la longitud de adherencia ayudó a cambiar el modo de fallo, pero no aumento significativamente la carga máxima como se observa en la Figura 9a.

Los especímenes con TRM con fibras de basalto recubiertas con resina acrílica y mortero con fibras cortas de vidrio mostraron un comportamiento consistente en diferentes longitudes de adherencia, con rotura del textil fuera en la porción sin mortero. Al aumentar la longitud de adherencia, se observó un incremento progresivo en la carga máxima (ver Figura 9b) y el deslizamiento correspondiente, indicando una mejora en la transferencia de tensiones a la matriz. Antes de alcanzar la carga máxima, la curva tensión-deslizamiento global mostró un comportamiento de endurecimiento. Aunque se presentaron fisuras por retracción en algunos especímenes en el contacto matriz-sustrato cerca de la zona de transferencia de tensiones, no se observó propagación ni apertura de fisuras durante o después de las pruebas, y la interfaz entre la matriz y el sustrato no desempeñó un papel importante en la configuración seleccionada de textiles y mortero.

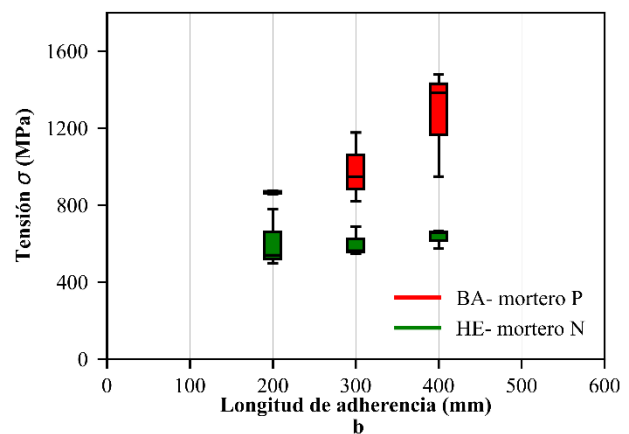
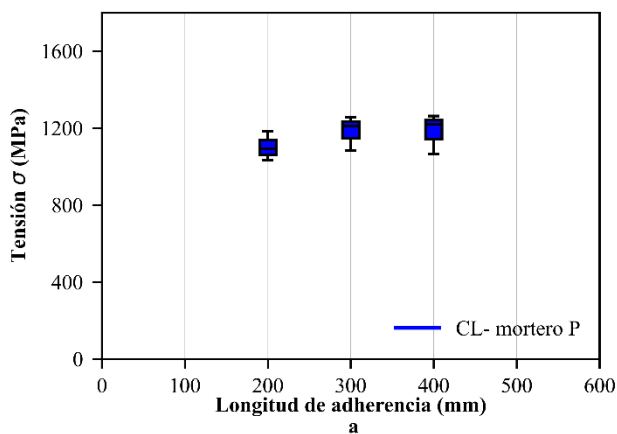


Figura 9. Gráfica longitud de adherencia - tensión de TRM usando: (a) mortero convencional, y (b) mortero con fibras cortas de vidrio.

Las probetas de TRM con fibras de cáñamo recubiertas con resina epoxi y mortero convencional presentaron deslizamiento de las fibras y desprendimiento de la última capa de mortero a medida se generaban nuevas fisuras para todas las longitudes de adherencia utilizadas. Una vez el desprendimiento de la capa de mortero alcanzaba el extremo inferior del TRM se producía el desprendimiento del textil (Figura 8). Este modo de fallo impidió que se llegara a la rotura del textil y no se observó un aumento significativo de la carga máxima como se muestra en la Figura 9b.



Figura 8. Modo de fallo de ensayos de adherencia con textil de cáñamo HE y mortero convencional.

4. Conclusiones

El presente estudio presenta el comportamiento a tracción y adherencia de compuestos TRM utilizando textiles de alta resistencia de carbono y basalto, así como fibras naturales de cáñamo, en combinación con diferentes matrices de mortero. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Influencia del recubrimiento: el recubrimiento de los textiles con resina epoxi mejoró significativamente la adherencia entre el textil y la matriz, resultando en mayores resistencias a tracción y capacidades de deformación. La resina látex fue menos efectiva, conduciendo a deslizamientos y fallas prematuras.
- Efecto de la composición del mortero: la resistencia a tracción del mortero influyó en el patrón de fisuración y la capacidad de deformación de los compuestos TRM. Los morteros con fibras sintéticas permitieron un mejor anclaje mecánico y una distribución mejorada de las fisuras.
- Configuraciones de ensayo: el método de sujeción en los ensayos de tracción afectó el patrón de fisuración y las mediciones de deformación. El método de abrazaderas presenta mejoría en el comportamiento del TRM cuando no existe riesgo de falla telescópica. Sin embargo, fisuras en la zona de sujeción reducen su eficacia. Para configuraciones donde el deslizamiento entre el textil y la matriz está controlado como los impregnados con resina epoxi o resina acrílica, ambos métodos presentan resultados similares.
- Comportamiento de adherencia: las longitudes de adherencia juegan un papel crítico en el rendimiento de adherencia de los sistemas TRM. Las longitudes de adherencia más largas mejoraron la transferencia de

tensiones y redujeron el deslizamiento. Sin embargo, la resistencia a tracción máxima de los textiles no siempre se pudo alcanzar debido a fallas telescópicas o desprendimientos de la capa superior de mortero.

- TRM de fibras naturales: los sistemas TRM de fibras de cáñamo mostraron potencial como soluciones de refuerzo ambientalmente amigables. Las capacidades de deformación se vieron afectadas por la composición del mortero, pero la resistencia a tracción máxima no se vio significativamente impactada. Las prestaciones de la malla de cáñamo pueden llegar a ser similares o superiores a las de la malla de basalto empleada si se utiliza una cuantía de refuerzo mayor.

Agradecimientos

El estudio presentado en este artículo se desarrolló en el marco del proyecto de investigación PID2021-123701OB-C21 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (MCIN/AEI/10.13039/501100011033/) y los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (ERDF), así como los proyectos de investigación TED2021-130272B-C21 y CNS2022-135574 financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) y Next Generation EU/PRTR de la Unión Europea. El primer autor desea agradecer al programa de becas FI SDUR por su invaluable apoyo. Los autores también desean reconocer al dedicado personal del laboratorio LATEM de la UPC, cuya experiencia y asistencia fueron importantes durante toda la campaña experimental. Además, los autores agradecen a la empresa Mapei y a sus empleados por su cortesía al suministrar los materiales necesarios y brindar la asistencia técnica necesaria.

Referencias

- [1] E. Ferrier, O. Rabinovitch, L. Michel, Mechanical behavior of concrete–resin/adhesive–FRP structural assemblies under low and high temperatures, *Constr Build Mater* 127 (2016) 1017–1028. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.127>.
- [2] Z.C. Tetta, D.A. Bournas, TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures, *Compos B Eng* 106 (2016) 190–205. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.026>.
- [3] S.M. Raoof, D.A. Bournas, TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behaviour at high temperatures, *Constr Build Mater* 154 (2017) 424–437. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.195>.
- [4] L.N. Koutas, Z. Tetta, D.A. Bournas, T.C. Triantafillou, Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review, *Journal of Composites for Construction* 23 (2019). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000882](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000882).
- [5] J. Donnini, V. Corinaldesi, Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement, *Constr Build Mater* 145 (2017) 565–575. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.051>.
- [6] P. Rawat, S. Liu, S. Guo, M. Zillur Rahman, T. Yang, X. Bai, Y. Yao, B. Mobasher, D. Zhu, A state-of-the-art review on mechanical performance characterization and modelling of high-performance textile reinforced concretes, *Constr Build Mater* 347 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128521>.
- [7] D'Antino, C. Papanicolaou, Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites, *Compos B Eng* 127 (2017) 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.034>.
- [8] C. Signorini, A. Nobili, E.I. Cedillo González, C. Siligardi, Silica coating for interphase bond enhancement of carbon and AR-glass Textile Reinforced Mortar (TRM), *Compos B Eng* 141 (2018) 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.045>.
- [9] L. Yan, B. Kasal, L. Huang, A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering, *Compos B Eng* 92 (2016) 94–132. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>.
- [10] M. Corradi, S. Agnetti, C. Quintaliani, E. Speranzini, Experimental investigation on a FRCM bio-composite for sustainable retrofitting of masonry buildings, *Compos Struct* 329 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117753>.
- [11] G. Ferrara, C. Caggegi, E. Martinelli, A. Gabor, Shear capacity of masonry walls externally strengthened using Flax-TRM composite systems: experimental tests and comparative assessment, *Constr Build Mater* 261 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120490>.
- [12] A. Abbass, P.B. Lourenço, D. V. Oliveira, The use of natural fibers in repairing and strengthening of cultural heritage buildings, in: *Mater Today Proc*, Elsevier Ltd, 2019: pp. S321–S328. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.206>.
- [13] M. Gioffré, G. Navarra, N. Cavalagli, F. Lo Iacono, V. Gusella, C. Pepi, Effect of hemp

- bio composite strengthening on masonry barrel vaults damage, *Constr Build Mater* 367 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130100>.
- [14] L. Mercedes, L. Gil, E. Bernat-Maso, Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites, *Constr Build Mater* 175 (2018) 161–173.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.171>.
- [15] AC434, Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) and steel reinforced grout (SRG) composite systems AC434, ICC-ES International Code Council Evaluation Service (2016).
- [16] RILEM Technical Committee 232-TDT, W. Brameshuber, M. Hinzen, A. Dubey, A. Peled, B. Mobasher, A. Bentur, C. Aldea, F. Silva, J. Hegger, T. Gries, J. Wastiels, K. Malaga, C. Papanicolaou, L. Taerwe, M. Curbach, V. Mechtcherine, A. Naaman, J. Orlowsky, P. Hamelin, H.W. Reinhardt, S. Shah, R. Toledo, T. Triantafillou, A. Si Larbi, D. Garcia, L. Garmendia, S. Gopinath, F. Jesse, Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 49 (2016) 4923–4927.
<https://doi.org/10.1617/s11527-016-0839-z>.
- [17] A. D’Ambrisi, L. Feo, F. Focacci, Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete, *Compos B Eng* 43 (2012) 2938–2949.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.002>.
- [18] L.H. Sneed, T. D’Antino, C. Carloni, C. Pellegrino, A comparison of the bond behavior of PBO-FRCM composites determined by double-lap and single-lap shear tests, *Cem Concr Compos* 64 (2015) 37–48.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.007>.
- [19] EN 1015-11, Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, European Committee for Standardization (CEN) (2019).
- [20] EN 12390-3, Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens, European Committee for Standardization (CEN) (2019).