

CONTRIBUCIÓN MECÁNICA DEL AGREGADO FINO RECICLADO MEDIANTE LA MEJORA DE LA MICROESTRUCTURA EN LA ZONA DE INTERFASE

María E. Sosa¹, Claudio J. Zega², Yury A. Villagrán Zaccardi^{2,3}

¹ LEMaC -CITEMA, CONICET, Av. 60 y 124, Berisso, Argentina, ingmesosa@gmail.com

² LEMIT, CONICET, 52 e/121 y 122, La Plata, Argentina, hormigones@lemit.gov.ar

³ Magnel-Vandepitte Laboratory for Structural Engineering and Building Materials, Ghent University, Technologiepark-Zwijnaarde 60, Zwijnaarde, Bélgica, yuryvillagran@gmail.com

RESUMEN

La pasta de cemento presente en los agregados finos reciclados (AFR) causa menor densidad y mayor absorción y porosidad en comparación con los agregados finos naturales. La influencia de los AFR en morteros y hormigones es un tema sin consenso debido a que su rugosidad y alta porosidad podría indirectamente mejorar la microestructura de la zona de transición interfacial (ITZ), a la vez que el exceso de agua que se adiciona para compensar la absorción de los AFR podría aumentar la porosidad de la matriz. La preponderancia de uno u otro factor da como resultado un efecto positivo o negativo en el desempeño de las mezclas. En este trabajo, se presenta un estudio sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de morteros elaborados con 15, 30 y 45 % (en volumen) de AFR. Los resultados describen el cambio en la microestructura de los morteros con la incorporación de los AFR.

Palabras claves: agregados reciclados, absorción de agua, microestructura, comportamiento mecánico.

INTRODUCCIÓN

La pasta de cemento endurecida presente en la composición del agregado fino reciclado (AFR) es la principal diferencia con el agregado fino natural. Dicha pasta es la responsable de la mayor absorción y porosidad, y la menor densidad y durabilidad en comparación con los agregados finos naturales (AFN) [1-4]. Las propiedades del AFR dependen de la resistencia a compresión y el tipo de agregado natural constituyente del hormigón de origen, así como del proceso de trituración mediante el cual se obtiene el AFR [1-5].

El uso de residuos de hormigón como agregado en la producción de nuevos hormigones es indispensable hoy en día para tomar sostenible esta industria. La fracción gruesa de estos residuos se está utilizando con éxito para la producción de hormigón en varios países. Sin embargo, la fracción fina se descarta con frecuencia ya que se considera que su alta absorción y forma angular causan efectos perjudiciales en el desempeño del hormigón. No obstante, también numerosos estudios [1, 3, 4] concluyen que el uso de AFR para elaborar hormigón es técnicamente viable. Los resultados opuestos pueden explicarse, por un lado, por el agua adicional que se agrega para compensar la absorción del AFR, lo que aumenta la porosidad de la matriz cementicia, y por otro lado, por la alta

porosidad del AFR, que disminuye el efecto de pared y mejora la zona de transición interfacial (ITZ).

Con respecto a la corrección del agua de mezclado, publicaciones recientes [5-8] sugieren que la absorción de agua por parte de los agregados durante el mezclado es menor que la cantidad correspondiente a sus capacidades de absorción. Sin embargo, esta no es una idea novedosa, Newman [9] presentó resultados que indican que, durante el mezclado, los agregados secos alcanzan un grado de saturación menor que cuando son sumergidos en agua durante 24 h. Neville [10] explicó esta diferencia por un efecto de sellado causado por la pasta fresca de cemento en la estructura de poro del agregado. Los métodos actuales para la determinación de la capacidad de absorción de agua de los agregados finos pueden generar diferencias de más de un 200 % del valor determinado [8]. Luego, la cantidad adicional de agua que se agrega puede aumentar la relación a/c efectiva en la mezcla si la misma no es absorbida por los agregados [11-13].

Con respecto a la ITZ, algunas investigaciones se han centrado en la de los agregados gruesos reciclados [14,15]. Estos estudios concluyen que dicha ITZ mejora en comparación con la de los agregados gruesos naturales. En contraposición, se ha descrito una ITZ deficiente cuando se usa AFR [16]. Sin embargo, en dicho trabajo, el desempeño de los morteros debería asociarse de manera directa con el grado de compensación del agua de mezclado de la absorción del agregado utilizado. Este trabajo tiene por objetivo identificar las mejoras en la ITZ debido al empleo de AFR y vincularlas con las propiedades de los propios AFR y de los morteros con ellos elaborados.

EXPERIMENTAL

Metodología

Se elaboró un mortero patrón de relación a/c 0,40 y relación arena/cemento 3,44. La fracción de arena se compuso con un 55% (en volumen) de arena silícea de río (AS) y 45 % (en volumen) de arena de trituración granítica (AT). Posteriormente se elaboraron morteros reciclados con 15, 30 y 45 % (en volumen) de AFR. Los porcentajes indicados refieren al total de agregado, en donde se reemplaza la AT por AFR. En consecuencia, en el mortero con 15 % de AFR, el agregado fina está compuesto por 15 % de AFR, 30 % de AT y 55 % de AS. El AFR se obtuvo de la trituración de un hormigón convencional (resistencia a la compresión de 35 MPa y con piedra partida granítica). El AFR se usó seco y no se compensó el agua de mezclado por la absorción del mismo. Los ensayos comprendidos en estado fresco incluyen la medición del extendido mediante la mesa de caída libre, luego de finalizado el mezclado y a los 30 minutos desde el contacto del agua con el cemento, y de la velocidad y capacidad de exudación. En estado endurecido se evaluó la absorción de agua, porosidad y resistencia a la compresión. Además, se prepararon secciones pulidas de cada mortero para evaluar la microestructura mediante SEM/BSE.

Agregados

Las propiedades de los agregados finos bajo estudio se presentan en la Tabla 1 y sus granulometrías (IRAM 1505) en la Figura 1. La distribución granulométrica de las arenas AT y AFR resultan similares, siendo algo más gruesa el AFR. La densidad y contenido de material menor a 75 μm resulta menor en el agregado AFR en comparación con AT. Contrariamente, la absorción de agua y la pérdida de material por ataque con sulfatos resultan significativamente mayores en el AFR respecto de la AT. Estas diferencias son consecuencia directa de la presencia de la pasta de cemento endurecida en la composición del AFR, la cual genera una zona de interfaz que resulta atacada por la solución de sulfato de sodio a la vez que su mayor porosidad se traduce en una mayor absorción.

Tabla 1: Propiedades de los agregados utilizados.

Agregado	Densidad (IRAM 1520)	Absorción (%) (IRAM 1520)	Durabilidad (%) (IRAM 1525)	Partículas menores a 75 μm (%) (IRAM 1540)	Contenido de pasta (%) (ASTM D 1084)
AS	2,65	0,50	5,0	0,2	---
AT	2,69	0,36	2,1	4,0	---
AFR	2,49	4,60	8,3	2,7	33

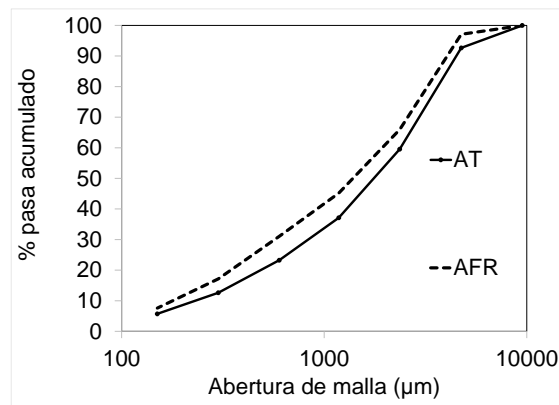


Figura 1: Granulometrías de AT y AFR.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades de morteros

El extendido determinado en los morteros, inicial y a los 30 minutos desde el contacto del agua con el cemento, se presenta en la Figura 2. Puede observarse que el extendido es menor en los morteros con AFR respecto del mortero patrón. Este hecho puede ser atribuido a la absorción por parte del AFR de parte del agua de mezclado, lo que reduciría el agua disponible para fluidificar la mezcla. No obstante, la disminución en el extendido inicial respecto del mortero patrón no resulta directamente proporcional al contenido de AFR utilizado. Al considerar el extendido a los 30 minutos desde el contacto entre el agua y el cemento se observa que la caída es mucho mayor en los morteros con AFR respecto del patrón. La falta de proporcionalidad entre el contenido de AFR utilizado y la pérdida de extendido resulta aún más notoria. Estos resultados podrían indicar que parte de la pérdida de extendido no se deba solo a la absorción de agua por parte de los agregados, sino que la forma más angulosa y textura superficial más rugosa intervengan en tal sentido.

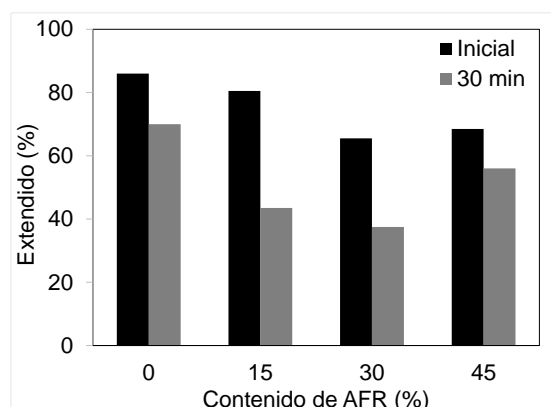


Figura 2: Extendido.

En la Figura 3 se presenta a) la velocidad y b) capacidad de exudación de los morteros bajo estudio. Puesto que este ensayo no se encuentra normalizado para morteros, se siguieron los lineamientos indicados para hormigones en la norma IRAM 1604, utilizando como recipiente un cilindro de pvc de 4 cm de diámetro. Surge de la figura que la velocidad de exudación disminuye de manera significativa cuando el porcentaje de AFR es superior al 15 %. Contrariamente, la disminución en la capacidad de exudación respecto del mortero patrón resulta sutil. Ambos parámetros (velocidad y capacidad de exudación) son influenciados por la cantidad de agua libre en la mezcla. La absorción por parte del AFR de dicha agua generaría un impacto directo disminuyendo ambos parámetros. Sin embargo, el menor contenido de finos en el AFR respecto de la AT podría mitigar tal efecto generando el comportamiento descrito en los morteros.

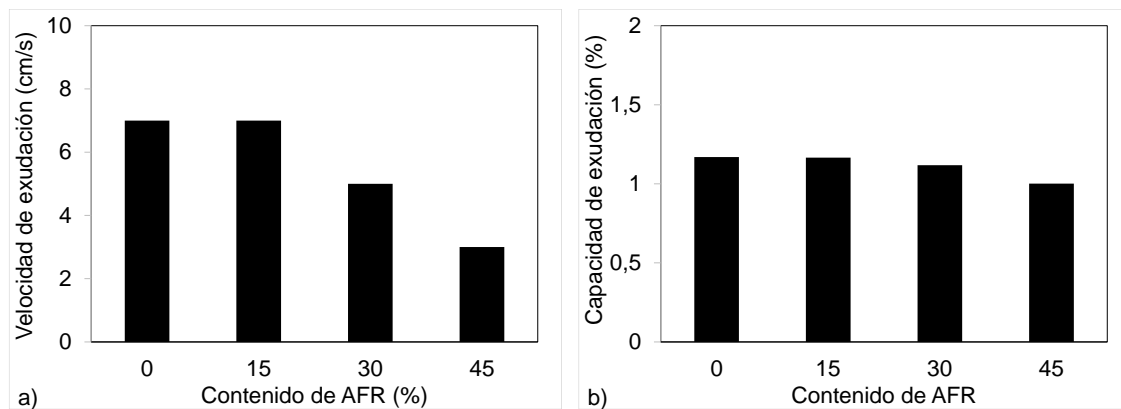


Figura 3: a) velocidad de exudación b) capacidad de exudación.

En la Figura 4 se informan los resultados de a) absorción y b) porosidad de los morteros bajo estudio. Tanto la absorción como la porosidad resultaron mayores en los morteros con AFR en comparación con el mortero patrón. A pesar de dicho incremento, no se observa una tendencia entre las propiedades bajo estudio y el porcentaje de AFR utilizado.

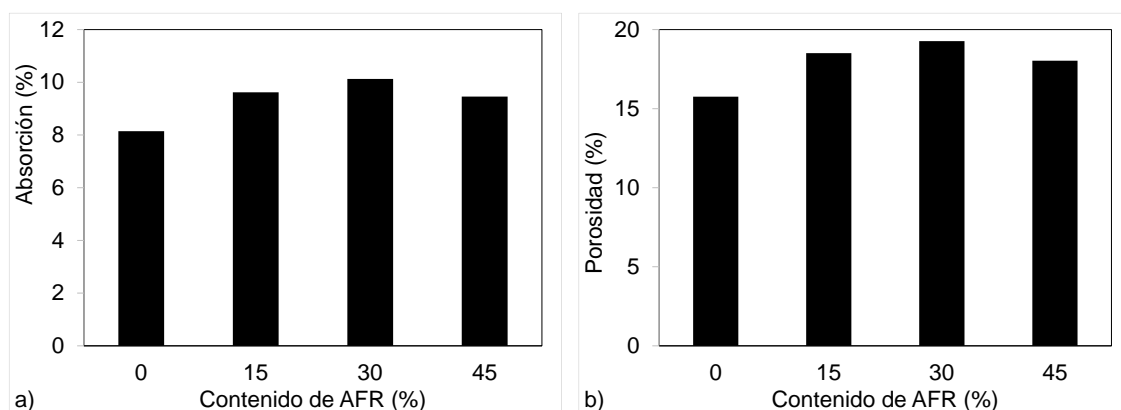


Figura 4: a) absorción y b) porosidad de los morteros.

Debido a la mayor porosidad del AFR frente a la AT, es esperable que a medida que aumente su contenido la porosidad del mortero se incremente. Sin embargo, como no se adicionó agua para compensar la absorción del AFR, y en base a las propiedades en estado fresco, parte del agua de la mezcla pudo ser absorbida y consecuentemente la relación a/c disminuiría conforme aumenta el contenido de AFR. Dicho efecto podría compensar la mayor porosidad de los morteros debido al empleo de AFR y explicar de este modo la falta de proporcionalidad entre las propiedades evaluadas y el porcentaje de AFR.

En la Figura 5 se presenta la resistencia a compresión a 28 días en función de: a) el porcentaje de AFR utilizado y b) la relación a/c efectiva. Puede observarse que la resistencia a compresión se incrementa con el contenido de AFR empleado. Tal incremento es el resultado de la menor relación a/c efectiva, tal como se desprende de la Figura 5 b). Los resultados ponen de manifiesto que la porosidad del AFR resulta en una variable secundaria respecto a la resistencia si la absorción de agua del mismo no es compensada mediante la adición al agua de mezclado.

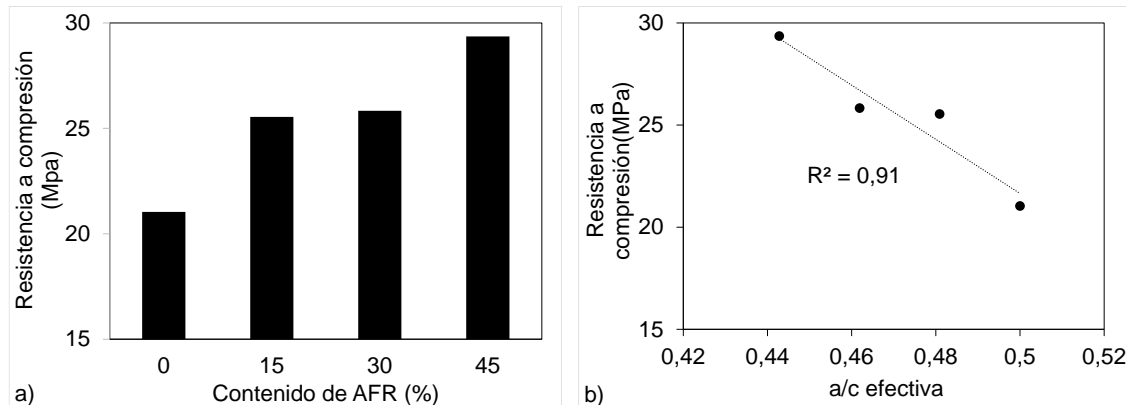


Figura 5: Relación entre la Resistencia a compresión y a) contenido de AFR, b) relación a/c efectiva.

Al emplear AFR en mezclas cementicias es común compensar su absorción de agua incrementando el contenido de agua de mezclado con el fin de obtener un mismo nivel de asentamiento que en la mezcla patrón. Esta adición de agua permite mejorar las propiedades en estado fresco pero causan una incidencia negativa en la resistencia a compresión [17-20]. En los morteros bajo estudio, al emplear los AFR sin compensar su absorción, se obtuvo un incremento en la resistencia a compresión respecto al mortero patrón (21, 23 y 40 % para 15, 30 y 45 % de AFR respectivamente), en tanto que las mermas en el extendido fueron del 6, 24 y 20 % para 15, 30 y 45 % de AFR respectivamente. Para evitar tales pérdidas en la fluidez de las mezclas, el empleo de aditivos reductores de agua podría resultar eficiente. No obstante, para compensar la absorción de los AFR podría adoptarse como criterio la resistencia a compresión de diseño, y no la consistencia como actualmente ocurre.

Estudios microestructurales

La Figura 6 muestra imágenes SEM/BSE sobre cortes pulidos de los morteros. Se observa una mayor microfisuración en el mortero patrón que en los morteros con AFR. Si bien es posible que algunas microfisuras se deban al preacondicionamiento de las muestras, las diferencias podrían ser un indicativo de una mayor compatibilidad entre las partículas de AFR y la matriz del nuevo mortero en comparación con los AT. La reducción en la relación a/c efectiva debido al uso de AFR seco es difícil de detectar a través de las imágenes SEM. Sin embargo, ciertas diferencias en la ITZ son evidentes. Algunas aureolas alrededor de la ITZ se observan entre partículas de AT, e incluso entre partículas de AT y de AFR. Sin embargo, no se observan aureolas entre partículas AFR. Esta falta de defectos en los morteros reciclados es causada por la absorción de agua por las partículas secas de AFR, lo que impide la acumulación de agua en estas zonas.

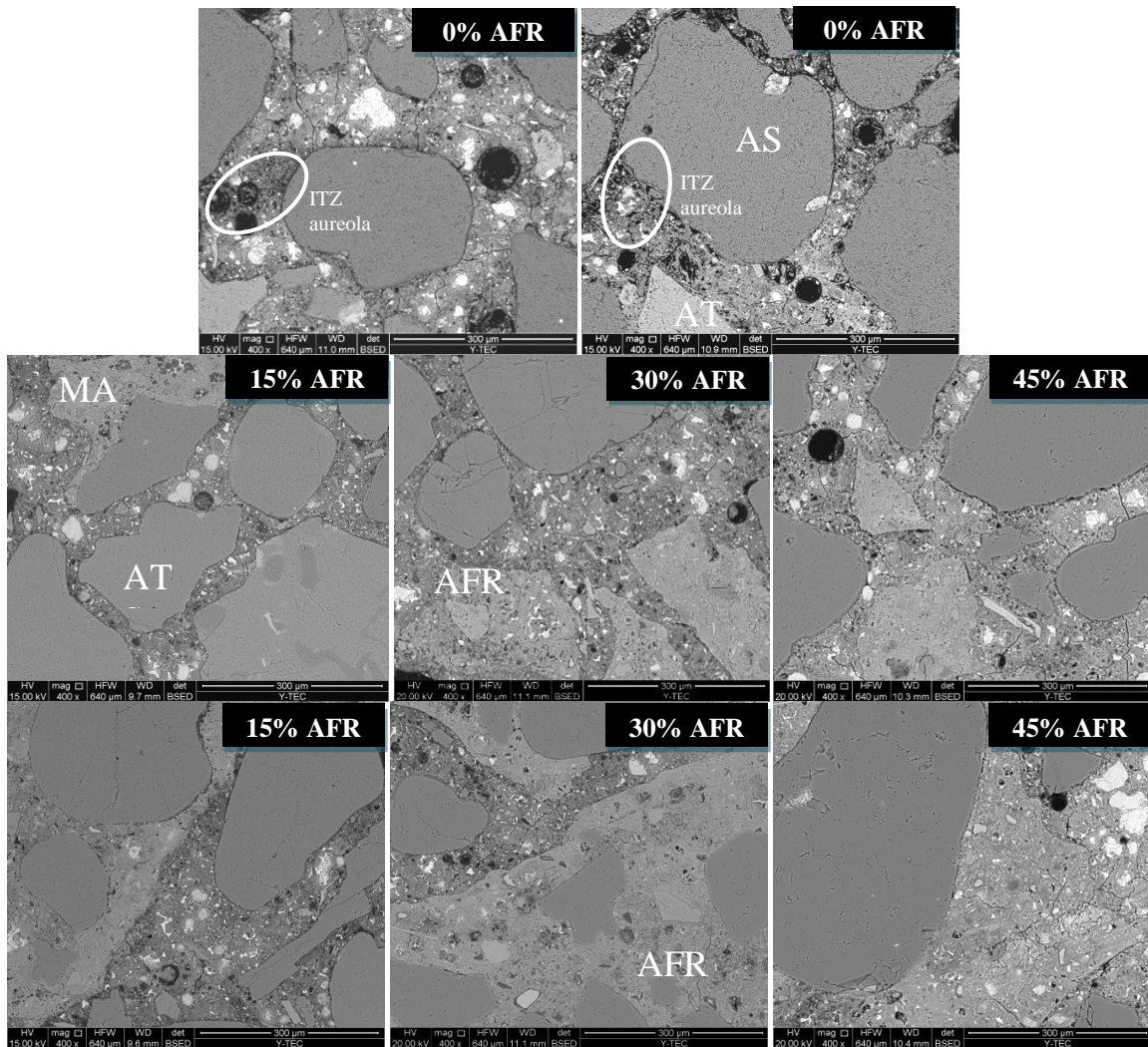


Figure 6: Imágenes SEM/BSE de los morteros. ITZ: zona de transición interfacial; AS: arena silíceica de río; AT: arena de trituración granítica; AFR: agregado fino reciclado; MA: mortero del AFR.

La Figura 7 muestra imágenes SEM convertidas en imágenes binarias. Un análisis de contraste entre la ITZ formada por las partículas de AFR y la nueva pasta muestra que la ITZ mortero-AFR apenas se distingue, mientras que la ITZ mortero-AT muestra un espesor consistente que parece ser independiente del contenido de AFR en el mortero. La absorción de agua por el AFR no parece afectar en un grado significativo el grosor de la ITZ.

De las diferentes propiedades evaluadas en los morteros, con excepción de la resistencia a compresión, se observa consistentemente una tendencia a un menor desempeño al utilizar AFR. Sin embargo, la disminución en la performance de los morteros no resulta directamente proporcional al contenido de AFR utilizado. Ello puede explicarse a partir de un efecto contrapuesto entre la menor calidad de los AFR en comparación con el AT, debido a la pasta de mortero endurecida presente en su composición, y la mejora en la calidad de interfaz producto de una menor relación a/c producida por la absorción parcial del agua de mezclado por parte del AFR.

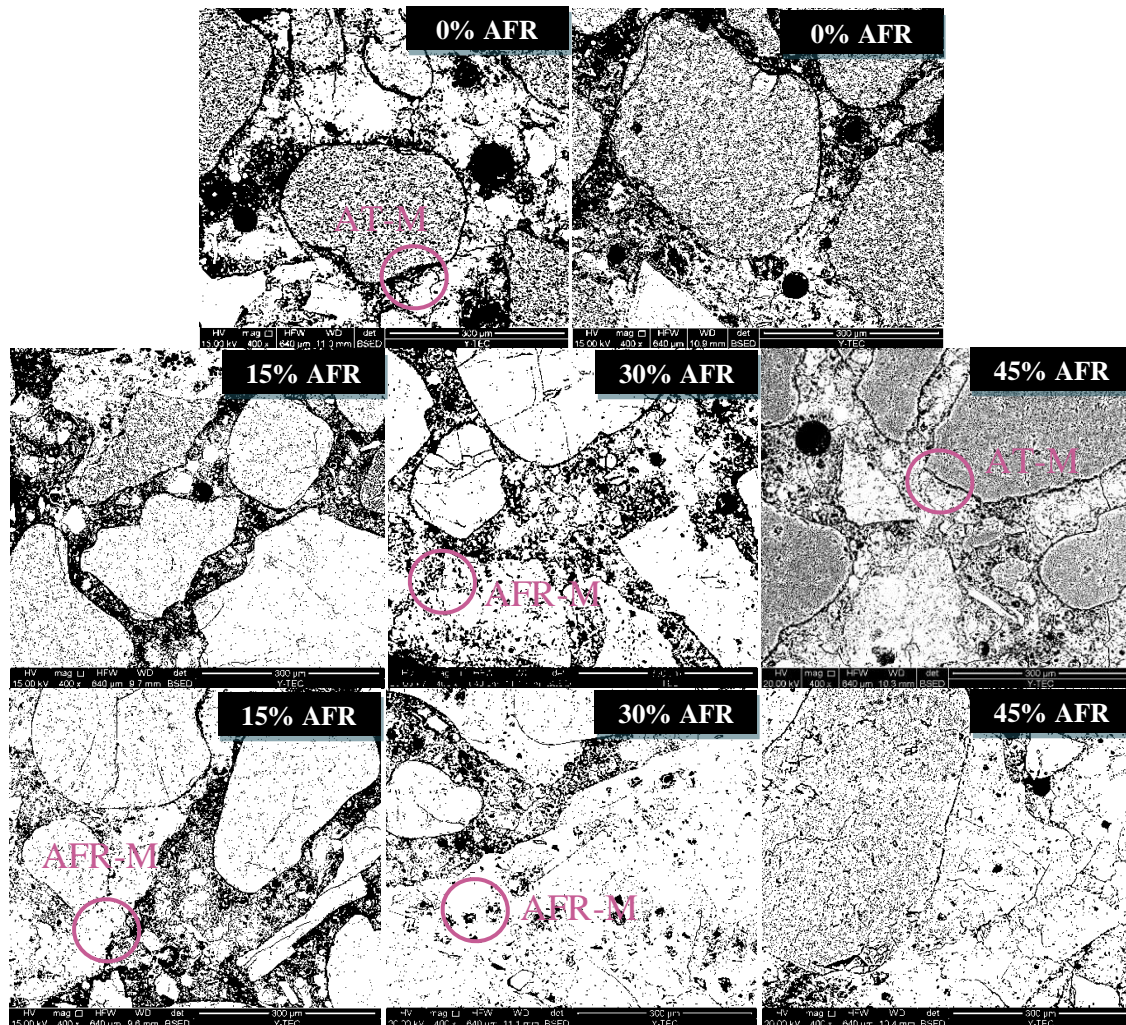


Figura 7: Imágenes binarias SEM/BSE.

CONCLUSIONES

A partir de la evaluación de distintas propiedades en estado fresco y endurecido de morteros con distintos contenidos de AFR, puede indicarse que:

Los valores de extendido inicial y a 30 minutos desde el contacto del agua y el cemento fueron menores en los morteros con AFR. Sin embargo, la disminución relativa del extendido resultó menos significativa que el aumento relativo en la resistencia, en comparación con el mortero patrón. En consecuencia, para compensar la absorción de los AFR podría adoptarse como criterio la resistencia a compresión y no la consistencia como actualmente ocurre en el diseño de morteros y hormigones.

Tanto la matriz como la ITZ de los morteros con AFR muestran una mejora en comparación con el mortero patrón. A pesar de una mayor porosidad y absorción de agua que el mortero patrón, también mostraron una mayor resistencia a la compresión. El empleo de AFR seco causa una disminución en la relación a/c efectiva de la matriz. Este efecto no solo debe entenderse como una afectación de las propiedades volumétricas, sino también como una afectación de la ITZ.

REFERENCIAS

- [1] Solyman M, "Classification of recycled sands and their applications as fine aggregates for concrete and bituminous mixtures", PhD Thesis, Universität Kassel, Kassel, Germany, (2005), 352p.
- [2] Kou S, "Reusing recycled aggregates in structural concrete", PhD Thesis, Polytechnic University Hong Kong, Hong, Kong, Japan, (2006), 206p.
- [3] Cartuxo F, de Brito J, Evangelista L, Jiménez JR, Ledesma EF, "Rheological behaviour of concrete with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer", *Construction and Building Materials*, 89, (2015), 36-47.
- [4] Evangelista L, Guedes M, de Brito J, Ferro AC, Pereira MF, "Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste", *Construction and Building Materials*, 86, (2015), 178-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112>
- [5] Velay-Lizancos M, Martínez-Lage I, Vázquez-Herrero C, Vázquez-Burgos P, "Empirical definition of effective water/cement ratio in mortars with recycled aggregate depending on the absorption", En: *Proceedings of the International Congress on Construction and Eco-efficient Solutions*, Sevilla, Spain, (2017), 505-528.
- [6] Li Z, Liu J, Tian Q, "Method for controlling the absorbed water content of recycled fine aggregates by centrifugation", *Construction and Building Materials*, 160, (2018), 316-325.
- [7] Li Z, Liu J, Zhong P, "Assessment of the Absorption of Recycled Fine Aggregates in Paste-Determination of the Free Water Content of Paste", *Proceedings of the Service Life Design for Infrastructures (SLD4)*, Delft, Netherlands, (2018), 782-792.
- [8] Sosa ME, Carrizo L, Zega C, Villagrán Z Y, "Water absorption of fine recycled aggregates: effective determination by a method based on electrical conductivity", *Materials and Structures*, (2018), 51: 127.
- [9] Newman K, "The effect of water absorption by aggregates on the water/cement ratio of concrete", *Magazine of Concrete Research*, 11, 33, (1969), 135-142.
- [10] Neville AM, "Tecnología del Concreto", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., México (1975).
- [11] Sosa M, Villagrán Zaccardi Y, Zega C, "Durability of recycled concretes: Another Cinderella Tale", *Proceedings of the Service Life Design for Infrastructures*, Delft, Netherlands, (2018), 820-830.
- [12] Maimouni H, Remond S, Huchet F, Richard P, Thiery R, Descantes Y, "Quantitative assessment of the saturation degree of model fine recycled concrete aggregates immersed in a filler cement paste", *Construction and Building Materials*, 175, (2018), 496-507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.211>
- [13] Leite MB, "Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição", PhD Thesis, Escola de Engenharia, Universidad Federal Rio Grande Do Sul, Rio Grande Do Sul, Brazil, (2001), 215p.
- [14] Bonifazi G, Capobianco G, Serranti S, Eggimann M, Wagner E, Di Maio F, Lotfi S, "The ITZ in concrete with natural and recycled aggregates: study of microstructure based on image and SEM analysis", *Proceedings of the 15th Euroseminar on Microscopy applied to Building materials*, Delft, Netherlands, (2015), 299-308.
- [15] Sidorova A, Barra M, Aponte D, Vázquez E, "Micromechanical and Microstructural Study of ITZ Paste/Recycled Aggregate", *Proceedings of the international conference on Sustainable Structural Concrete*, La Plata, Argentina, (2015).
- [16] Zhao Z, Remond S, Damidot D, Xu W, "Influence of recycled concrete aggregates on the properties of mortars", *Construction and Building Materials*, 81, (2018), 179-186.
- [17] Montero J, Laserna S, "Influence of effective mixing water in recycled concrete", *Construction and Building Materials*, 132, (2017), 343-352. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.006>
- [18] Maimouni H, Remond S, Huchet F, Richard P, Thiery R, Descantes Y, "Quantitative assessment of the saturation degree of model fine recycled concrete aggregates immersed in a filler cement paste", *Construction and Building Materials*, 175, (2018), 496-507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.211>
- [19] Li Z, Liu J, Zhong P, "Assessment of the absorption of fine recycled aggregates in paste – Determination of free water content of paste", *Proceeding of 4th international conference on Service Life Design for Infrastructure (SLD4)*, Delft, Netherland, (2018).
- [20] Le T, Rémond S, Le SG, García-Díaz E, "Fresh behavior of mortar based in recycled sand – Influence of moisture condition", *Construction and Building Materials*, 106, (2016), 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.071>