

Refuerzo secundario de pastas de cemento portland ultrafino con nanofibras agregadas de poli (alcohol vinílico)

Secondary reinforcement of portland cement pastes using nanofibers aggregated based on polyvinyl alcohol.

Edgar Franco Medina (Autor Principal, Autor Oficial de Contacto)
edgar.franco@correounivalle.edu.co
Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales, GMC
Teléfono: +57 2 3302436, fax: +57 2 3392450
Dirección Postal: A.A. 25360, Cali, Colombia

Silvio Delvasto Arjona
Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales,
GMC, Cali, Colombia
silvio.delvasto@correounivalle.edu.co

Héctor Fabio Zuluaga Corrales
Universidad del Valle, Departamento de Química, Cali,
Colombia
hector.zuluaga@correounivalle.edu.co

Vicente Amigó Borrás
Universidad Politécnica de Valencia, España
vamigo@mcm.upv.es

Irma Inírida Angarita Moncaleano
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
iangaritam@unal.edu.co

Código: 0172

Fecha de Aceptación: 1 diciembre 2013

Resumen

En este artículo se presentan resultados de una investigación sobre la validación de nanofibras agregadas de PVA obtenidas por sol-gel electrohilado, para reducir la retracción y las fisuras por fraguado de pastas de cemento portland ultrafino. La metodología aplicada consistió en variar la longitud de las nanofibras agregadas de PVA en 6 y 12 mm. Este procedimiento permitió evaluar el desempeño de estas nanofibras y compararlas con el de la misma matriz cementicia reforzada con fibras comerciales de polipropileno (PP). Las técnicas de caracterización aplicadas sobre las pastas fibrorreforzadas fueron granulometría láser del cemento, ensayos a la compresión, a la flexión e impacto y observación de falla a través de microscopía electrónica de barrido (SEM). Igualmente se observó la retracción y el fisuración a edades tempranas. Los resultados mostraron que las pastas de cemento con fibras agregadas de PVA presentaron resultados mejorados comparados con las pastas de cemento que contenían fibras de PP. Este tipo de material compuesto podría ser utilizado en la elaboración de túneles, lechadas en la reparación de edificaciones, y en general, en aplicaciones que requieran la inyección o relleno debido a las características fluidas de este tipo de cementos.

Abstract

This work deals with the behavior of electrospun nanofibers aggregated of poly vinyl alcohol (PVA) as the secondary reinforcement for reducing the drying shrinkage of cement during the curing at early ages; these nanofibers were added as reinforcement to a matrix of ultrafine portland cement paste in two different lengths (6 mm and 12 mm); their behavior was similar to that of polypropylene (PP) fibers embedded in the same matrix. The pastes were characterized by cement laser particle sizer; compression, flexural and impact testing, and failure analysis through scanning electron microscope (SEM). Shrinkage and cracking were measured at early ages. The results showed that the cement pastes with addition of PVA fibers showed improved results compared to cement pastes containing PP fibers. Such composite materials may be useful in making tunnels, grouts for repairing buildings, and in general, in applications that require injection or filling fluid due to characteristics of this type of cement.

Keywords: Polyvinyl alcohol; Electrospun nanofibers; Ultrafine cements; Nanofibers; Polypropylene fibers; Cementitious Composites

Introducción

En la actualidad los nanomateriales han permitido el desarrollo de nuevos composites para múltiples aplicaciones. El control y obtención de este tipo de estructuras de tamaño nanométrico ha llevado a su utilización en muchos campos de aplicación como la medicina, electrónica, desarrollo de tejidos inteligentes, entre otros. En los últimos años ha crecido el interés por un proceso llamado electrohilado con el cual se pueden obtener nanofibras, o también fibras ultrafinas, a partir de polímeros en solución o en estado fundido que se proyectan sobre una pantalla colectora, debido a un campo eléctrico generado por una fuente de alto voltaje. Este proceso tiene diversas aplicaciones en la obtención de tejidos de ingeniería para aplicación en filtros, sensores, biomedicina, materiales compuestos, etc. Teniendo en cuenta la relevancia actual del proceso de electrohilado en el campo de la nanotecnología,

este trabajo de investigación presenta los resultados de la validación de nanofibras de PVA obtenidas por sol-gel electrohilado como refuerzo secundario en pastas de cemento portland ultrafino.

Descripción del problema

En la industria de la construcción, la retracción por fraguado a edades tempranas de los materiales cementicios es un problema porque produce fisuras que reducen el óptimo desempeño de las estructuras que se fabrican con estos materiales, disminuyendo sus propiedades mecánicas y su durabilidad. Convencionalmente este problema se ha minimizado utilizando microfibras de PP y PVA, principalmente, pero con estos métodos el problema se resuelve de forma parcial. Este artículo pretende analizar la problemática de la

retracción, a partir de la validación de nanofibras de PVA en matrices cementicias, y plantea la siguiente pregunta: ¿Es posible reducir la retracción a edades tempranas en el fraguado de materiales compuestos de matriz de cemento ultrafino, que disminuyan la formación de fisuras en el composite y de manera indirecta mejore sus propiedades mecánicas, con el uso de nanofibras agregadas de PVA? La hipótesis que aquí se establece, es que las nanofibras poliméricas presentan una mayor área superficial con relación a las microfibras, lo que puede llegar a presentar un mejor efecto de reducción en la retracción, porque tendrían un mayor contacto con la matriz cementicia. Este tipo de materiales compuestos podrían ser utilizados en la elaboración de túneles, lechadas en la reparación de edificaciones, y en general, en aplicaciones que requieran la inyección o relleno, debido a la fluidez de este tipo de materiales basados en cemento.

Estado del arte

El estudio de las nanofibras poliméricas obtenidas por el proceso de electrohilado ha ganado importancia en los últimos años, debido a su utilización en el campo de los nanomateriales. Algunas investigaciones realizadas por Tang et al. (2007) y Haiying et al. (2006) han estudiado la posibilidad de producir nanofibras por electrohilado a partir de mezclas poliméricas incorporando nanopartículas, o su utilización como refuerzo en materiales compuestos. En esta última aplicación se encuentran estudios de la obtención de fibras ultrafinas electrohiladas de poli (benzimidazola) (PBI), con las cuales se han conformado nanocompuestos de un sistema “no tejido” de PBI en una matriz epóxica (Kin y Reneker, 1999). Otros autores también han elaborado fibras ultrafinas electrohiladas de nylon, reforzando una resina dental, lo cual aportó tenacidad a la fractura del material compuesto (Fong, 2004).

Por otro lado, muchas investigaciones han reportado estudios relacionados con la obtención de nanofibras de poli (alcohol vinílico)(PVA), donde se han presentado resultados sobre las variables de control del proceso, tales como voltaje, flujo, distancia entre la aguja y el colector, entre otras variables. Su caracterización morfológica se ha realizado a través de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM), y con el uso de otras técnicas de caracterización, entre ellas: DSC, FTIR, DRX, etc. (Guerrini 2006; Koski et al. 2004; Li y Hsieh, 2006). Estos estudios abren la posibilidad de que estas fibras se utilicen como refuerzo de materiales compuestos. A partir de resultados de investigación previos (Franco et al. 2013; Franco et al., Marti, 2009), que describen la obtención de nanofibras agregadas de PVA por sol-gel electrohilado y sus tratamientos térmicos e intervención química a través de la reacción de formalización para producir fibras insolubles en agua, se lograron las características adecuadas para que las fibras sean validadas como refuerzo en matrices basadas en cemento portland (Cornejo, 2007).

A partir de lo anterior, el presente artículo de investigación presenta los resultados de la validación de las nanofibras agregadas de PVA como refuerzo secundario de pastas de cemento portland ultrafino, debido a la buena adhesión que reportan las fibras de PVA por su carácter hidrofílico. La función principal de estas fibras es la de evitar las fisuras producidas por la retracción en sus primeras edades de fraguado y con ello el mejoramiento indirecto de las propiedades mecánicas del material en estado endurecido (Rendon et al. 2001; Wang y Li, 2006). Los resultados son comparados con los obtenidos en

compuestos reforzados con fibras de polipropileno comerciales, como refuerzo secundario.

Metodología

Las nanofibras de PVA utilizadas en esta investigación fueron producidas usando el método reportado por Franco et al. (2013), que consistió en obtener un conjunto de nanofibras de PVA con un diámetro promedio de 548 nm aproximadamente, que luego fueron aglomeradas por el método de sol-gel formando hilos de 14.97 μm de diámetro promedio. Adicionalmente las fibras se insolubilizaron en agua a través de la reacción de acetalización con formaldehído, y reportaron un módulo de Young medio de 5 GPa. Estas fibras fueron cortadas en dos longitudes, de 6 mm (PVA6) y de 12 mm (PVA12). El cemento portland ultrafino utilizado fue marca Rheocem 650 aportado por la empresa fabricante BASF. Esta empresa también aportó el aditivo superplastificante marca Gleniun Ace 425 y dos muestras de referencia (fibras de polipropileno de 6 mm de longitud y 32 μm de diámetro marca Bettorfiber-PP6, y otras de 12 mm de longitud y de 18 μm de diámetro, marca Crackstop 12-PP12). Estas fibras se adicionaron al cemento, en una cantidad de 500 a 600 g por metro cúbico, según recomendaciones del fabricante (BASF, 2006).

Es importante resaltar que en el campo de los materiales compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras, el empleo de bajas fracciones en volumen de fibra (<1%), se utiliza para reducir agrietamiento por retracción, mientras que de la regla de mezclas en materiales compuestos (Tassew y Lubell, 2014) solamente fracciones muy superiores pueden llevar al mejoramiento de propiedades mecánicas, como módulo de rotura, tenacidad y resistencia al impacto. Los volúmenes adicionados de las fibras ultrafinas de PVA y las PP incorporadas en el composite, fueron de 0,04% y 0,06% respectivamente, debido a la diferencia en la densidad de las mismas. Además de la ficha técnica del cemento se corroboró el tamaño de partículas a través de la granulometría láser. Luego se aplicó un diseño de experimentos, tomando como factores tiempo, tipo y longitud de fibra, donde se evaluaron la retracción, la fisuración a edades tempranas, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión. También se realizó un análisis de falla del material compuesto a través de SEM.

Análisis de resultados

Granulometría láser del cemento

El cemento portland utilizado, se caracterizó con el equipo de granulometría láser Mastersizer 2000 de Malvern Instrument. Los resultados indicaron que el diámetro promedio de las partículas de dicho cemento fue de 8.49 μm . Con relación a la distribución granulométrica, el 84% de las partículas presentaba tamaños menores que 15 μm y el 67%, tamaños menores que 10 μm . Estos resultados concuerdan con los presentados en la ficha técnica del proveedor, que indica que el 93% de las partículas poseía tamaños menores a 15 μm y el 79% inferiores al 10 μm , lo que muestra que efectivamente corresponde a un cemento portland ultrafino.

Ensayo de retracción de las pastas

Los resultados de retracción, que fueron medidos a 7 días de curado, muestran que el factor longitud no influye

efectivamente sobre la retracción, contrario al efecto del tipo de fibra, puesto que las fibras de PVA generan en las pastas una menor retracción con relación a las fibras de polipropileno, sin importar su longitud. Este resultado se puede observar en la tabla 1, que presenta las medias de los porcentajes de retracción, que indican la marcada influencia del tipo de fibra, lo cual se puede explicar por la naturaleza hidrofílica de las fibras de PVA, que permiten una mayor adhesión con el cemento y por ende una menor retracción. Estos resultados muestran que las mezclas que contenían las fibras PVA con 6 y 12 mm, lograron reducciones en la retracción del 47% y 55%, respectivamente; mientras que con las fibras de PP de 6 y 12 mm, al contrario, su retracción se incrementó en un 87% y 192%, respectivamente, con relación a una muestra patrón. Estos valores de retracción a 7 días, coinciden con lo reportado por (Wang y Li, 2006) en su investigación sobre materiales compuestos de matriz cementicia reforzada con fibras de PVA comerciales.

Tabla 1. Gráfica de la media de los % de Retracción. Fuente: Elaboración propia, 2011.

Tipo de Fibra	Longitud de Fibra		% de Retracción
	(mm)		
PP	6		0,1554
PP	12		0,2439
PVA	6		0,0439
PVA	12		0,0375
Patrón	---		0,0833

Tabla 2. Media de la resistencia a la compresión de las pastas. Fuente: Elaboración propia, 2011.

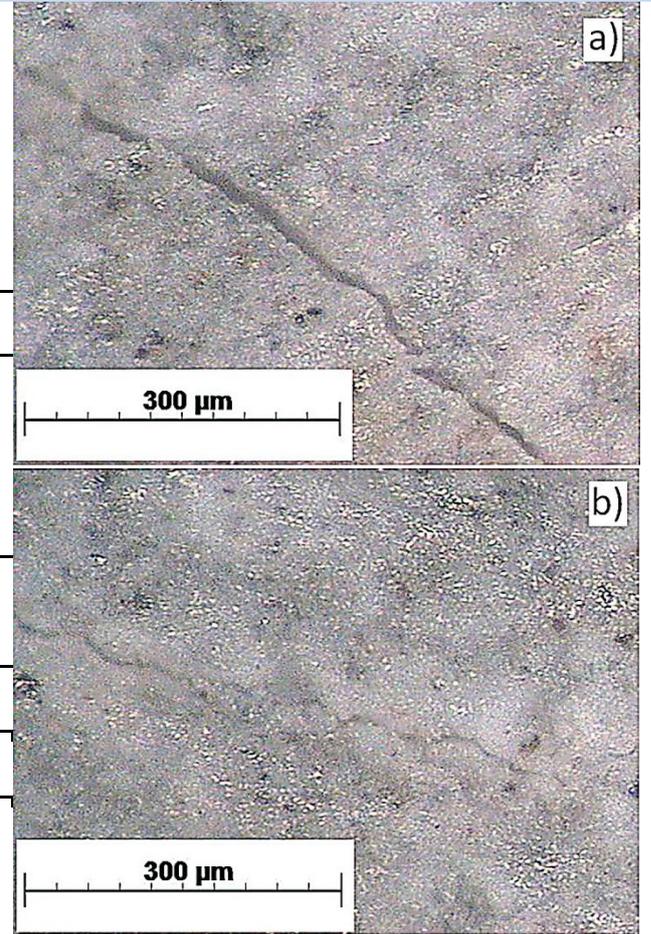
Tipo de fibra	Resistencia a la Compresión (MPa)			
	1 día	3 días	7 días	28 días
PP6	8,27	18,29	28,00	28,24
PP12	3,70	19,81	20,07	26,73
PVA6	7,83	25,85	27,60	28,54
PVA12	7,42	22,37	23,44	25,95
Patrón	8,87	21,84	24,70	25,69

Fisuras a edades tempranas

Se prepararon muestras cilíndricas de la pasta de cemento portland ultrafino (22 mm de alto por 15 mm de diámetro), que se ensayaron a 7 días de curado normal y con adición de los cuatro tipos de fibras (PP6, PP12, PVA6 y PVA12). Sobre estos cilindros se realizaron tres cortes con una cortadora de hilo, en la parte superior e inferior a 3 mm de cada extremo y un corte transversal en el punto medio de la altura. Se realizó una inspección de todas las caras seccionadas a través de un microscopio óptico. En las muestras inspeccionadas PP6 y PP12, se encontraron fisuras de 12 μm de ancho aproximadamente, como se observa en la figura 1 (a). En las muestras PVA6 y PVA12 las fisuras fueron de 5 μm , aproximadamente (ver figura 1b). Estos resultados son coherentes con los de retracción, que mostraron una reducción en esta propiedad con el uso de fibras de PVA y en consecuencia la disminución en el tamaño de las fisuras. Wang y Li (2006), realizaron mediciones del ancho de grieta a diferentes edades en compuestos cementicios reforzados con 2% de fibras de PVA, reportando ancho de

grietas del orden de 40 μm . Las investigaciones realizadas por Weimann y Li (2003), han mostrado anchos de grieta entre 31 y 46 μm . Esta diferencia, en comparación con las nanofibras agregadas de PVA (5 μm), se puede explicar por cambios en la composición de las matrices cementicias, como también de las fibras de PVA utilizadas en las otras investigaciones. Sin embargo indica una ventaja de las fibras de PVA agregadas sobre las comerciales.

Figura 1. Fisura sobre las pastas de cemento con fibras, a) PP y b) PVA. Fuente: Elaboración propia, 2011.



Ensayo de compresión de las pastas

El ensayo a la compresión de las pastas se hizo siguiendo la norma española UNE-EN 196-1, con una adecuación en las dimensiones de los cilindros usados de 15 mm de diámetro, por 23 mm de altura, debido a que la cantidad de nanofibras agregadas de PVA obtenidas era limitada. Los resultados experimentales presentados en la tabla 2 indican que las medias de la resistencia a la compresión se incrementan con el tiempo de curado. Este comportamiento es normal para este tipo de cementos y ha sido reportado por Kaufmann et al. (2004) en sus investigaciones a 7, 28 y 90 días. Con relación al tipo de refuerzo a las diferentes edades, se observa un mejoramiento en esta propiedad con el uso de fibras de 6 mm para ambos tipos de materiales a 28 días. Estos resultados se dieron, posiblemente, porque con esta longitud se logró una dispersión más aleatoria dentro de las probetas de 15 mm de diámetro, valor muy cercano a la longitud de las fibras de 12 mm, que quizá las orientó en la dirección de la altura del cilindro, y en otros casos las curvó reduciendo su buen desempeño.

Si comparamos los resultados del ensayo de compresión de la mezcla patrón, con cada uno de los resultados con los diferentes tipos de fibra, la muestra PVA6 mejoró su resistencia en un 11%, la PVA12, en 1%; la PP6 en un 9,8% y finalmente, la PP12, mejoró en un 4%. En comparación con la presente investigación, Davidson et al. (2008) presentaron resultados donde incorporaron en matrices cementicias, fibras de PVA de mayor resistencia y una mayor cantidad (1,26% en peso), logrando incrementos en la resistencia a la compresión del 20%.

Ensayo de flexión de las pastas

Este ensayo se realizó siguiendo la norma española UNE-EN 196-1, con un ajuste en las dimensiones de los prismas usados (60mm*15mm*10mm), debido a que la cantidad de fibras ultrafinas de PVA obtenidas fue limitada. Los resultados del ensayo de flexión que reportan el módulo de rotura (ver tabla 3), muestran un comportamiento similar al obtenido con el ensayo de compresión, en el cual también se observa un mejoramiento de la propiedad con la incorporación de las fibras de PVA de 6 mm de longitud, pero en este caso a partir del tercer día. Con relación a los efectos principales, según el tipo de material, se observa un mejor comportamiento a la flexión cuando se incorporan fibras de PVA en las pastas de cemento ultrafino, debido a su carácter hidrofílico que permite formar enlaces químicos fuertes entre la fibra y la matriz (Davidson et al., 2008).

Tabla 3. Media del módulo de rotura a flexión de las pastas reforzadas. Fuente: Elaboración propia, 2011.

Tipo de fibra	Módulo de rotura a flexión (MPa)			
	1 día	3 días	7 días	28 días
PP6	5,63	5,92	5,93	8,25
PP12	2,29	5,36	6,78	9,06
PVA6	4,00	6,30	8,23	10,70
PVA12	3,94	6,57	6,60	9,42
Patrón	4,03	5,52	7,17	8,33

Tabla 4. Media de la energía de impacto Charpy de las pastas reforzadas. Fuente: Elaboración propia, 2011.

Tipo de fibra	Energía de impacto (J/cm ²)			
	1 día	3 días	7 días	28 días
PP6	5,63	5,92	5,93	8,25
PP12	2,29	5,36	6,78	9,06
PVA6	4,00	6,30	8,23	10,70
PVA12	3,94	6,57	6,60	9,42
Patrón	4,03	5,52	7,17	8,33

La incorporación de las fibras de PVA agregadas en las pastas de cemento incrementó la resistencia a la flexión a 28 días, en un 29% para las fibras PVA6 y en un 13% para las PVA12, en comparación con la mezcla patrón. Para las fibras PP6 y PP12, los incrementos fueron del 1% y 9% respectivamente. V. Li (2003) ha realizado estudios con fibras de PVA utilizadas como refuerzo en materiales compuestos de matriz cementicia, donde reportó un mejoramiento en la resistencia a la flexión, del 100% y 60%, con contenidos de fibra del 1% y 2%, respectivamente, en comparación con la mezcla patrón, a 90

días. Esta diferencia en los resultados, en comparación con la presente investigación, radica en que Li usó mayores contenidos de fibra con propiedades mecánicas distintas, y distintos tiempos de evaluación en los ensayos. El hecho de que las fibras de PVA producidas en esta investigación tengan diámetros menores, en comparación con las comerciales (30 μm) a volúmenes iguales, ofrece una ventaja porque equivale a incorporar un mayor número de fibras y, por ende, tendrán una mayor área superficial en contacto con la matriz (Davidson et al., 2008).

Ensayo de impacto de las pastas

La tabla 4, que muestra los resultados de energía de impacto, indica que la incorporación de fibras de PVA presenta un mejor desempeño a edades tempranas, que posiblemente se deba a la naturaleza hidrofílica de las mismas, y que en contacto con la matriz cementicia mejora su adhesión. A edades entre 7 y 28 días, se observó un mejor desempeño con las fibras de polipropileno. Estos resultados acordes con los reportados por Santos (2008), indican que al realizarse el ensayo de impacto, la rapidez del mismo no permite un efecto de arrancamiento de las fibras de PVA, sino la rotura de las mismas debido a su buena adhesión con la matriz, lo que reduce la energía de impacto del material compuesto, en comparación con las fibras de PP. En los resultados a 28 días se identifica un mejor comportamiento de los compuestos con las fibras de 12 mm de longitud, esto puede ser debido a que esta longitud es más cercana a la crítica.

Análisis de falla de las pastas

La figura 2 (a) muestra la localización de la fibra PP6 en la pasta, posterior a la falla. En esta imagen - que igual a las presentadas en las figuras posteriores fue observada en un microscopio electrónico de barrido marca SEM JEOL JSM-6300 - se observa que a partir de la fibra se propagan algunas grietas. Adicionalmente, la superficie de la fibra tiene adheridas pocas partículas de cemento, lo cual indica baja adherencia con la matriz, que es característico en fibras de polipropileno. La figura 2 (b) muestra la localización de la fibra PP12, en la parte posterior a la falla. En la imagen se observa cómo a partir de la fibra se propagan algunas grietas. La figura 2 (c) presenta la composición determinada por Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) de una de las partículas de la superficie de la fibra de la figura anterior, encontrando contenido de calcio, lo que permitió verificar que se trató de una partícula de material cementicio. Adicionalmente se observa que las fibras son puntos de propagación de grietas.

La figura 3 (a) muestra la localización de una fibra PVA6 en la pasta, posterior a la falla. En esta pasta no se observa propagación de grietas a partir de la fibra. En esta misma figura también se observan partículas cementicias adheridas en la superficie de las fibras, que en algunos casos forman capas continuas, que indica una adhesión importante entre la fibra y la matriz, lo cual se puede atribuir a la naturaleza hidrofílica de las mismas y puede explicar el mejoramiento marcado en la reducción de la retracción, comparado con las pastas reforzadas con fibras de polipropileno.

En la figura 3(b) se corrobora la continuidad de la capa que recubre la fibra a lo largo de la misma y la figura 3(c) comprueba a través del análisis de composición por EDS, que evidentemente esa capa es de naturaleza cementicia debido al contenido de calcio. Esto demuestra que la naturaleza hidrofílica de las fibras de PVA aportan mayor adherencia con

matrices cementicias, lo cual también es reportado por Rendon et al. (2001), en sus estudios sobre la interface fibra de PVA y matriz cementicia. De acuerdo con Wang y Li (2003), esta

adhesión se debe a que las fibras generan un fuerte enlace químico con los hidratos del cemento.

Figura 2. Imagen SEM de la falla de las pastas de cemento con fibras de polipropileno de, a) 6 mm , b) 12 mm y c) EDS sobre PP. Fuente: elaboración propia, 2009.

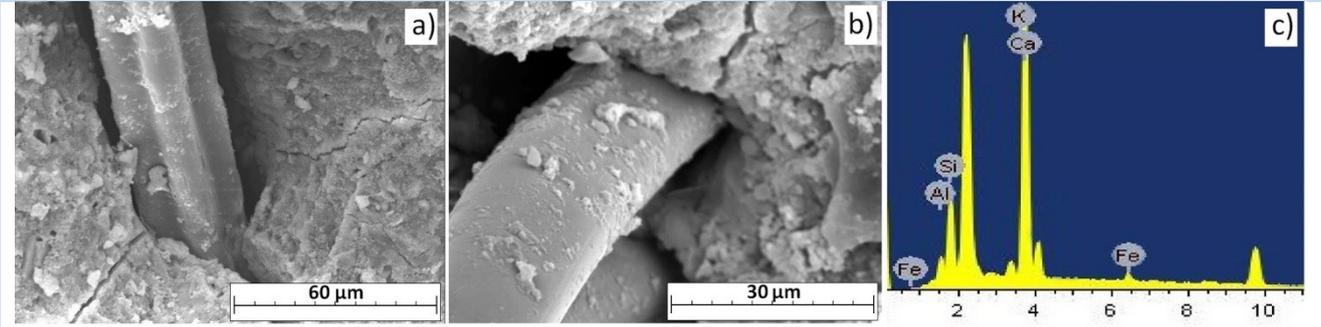
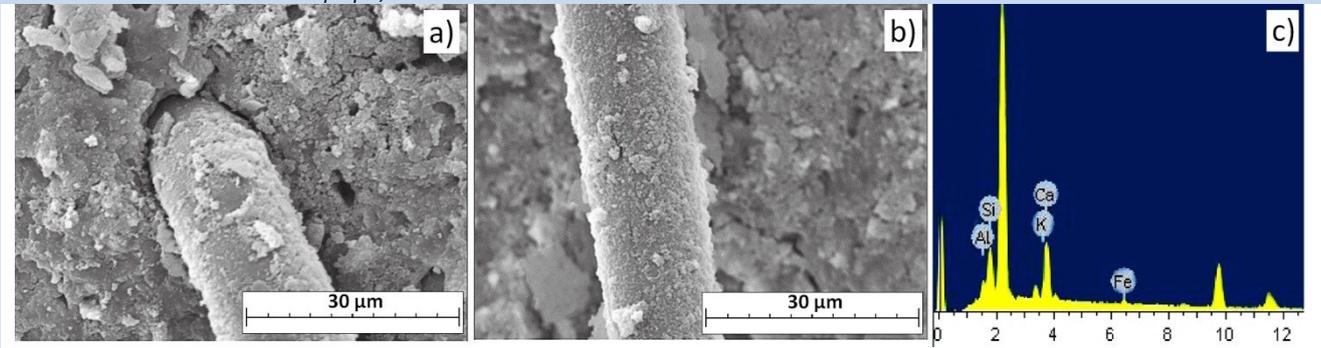
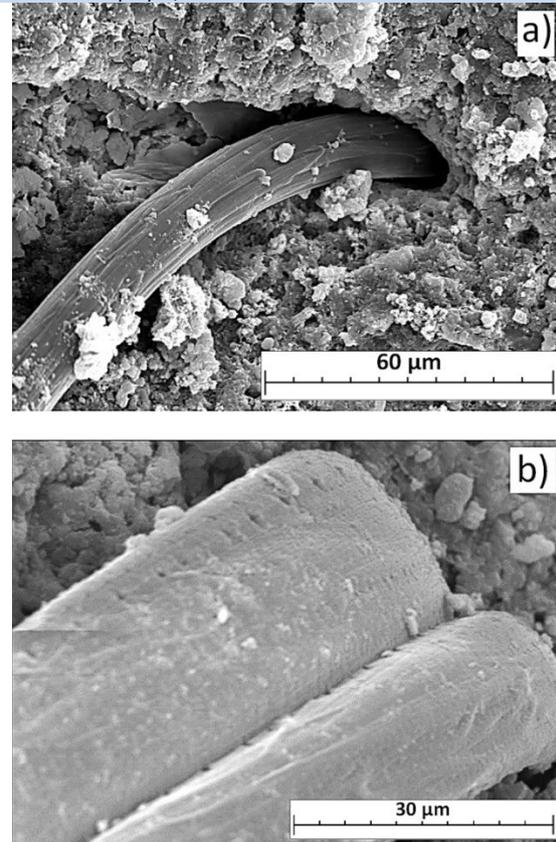


Figura 3. Imagen SEM de la falla de las pastas de cemento con fibras de PVA de, a) 6 mm, b) Recubrimiento sobre la fibra y c) EDS sobre el recubrimiento. Fuente: elaboración propia, 2009.



La figura 4 (a) muestra la localización de la fibra PVA12 en la pasta, posterior a la falla. Se observa un mínimo de propagación de grietas alrededor de la misma, comparado con las imágenes anteriores con fibras de PP. Esto puede indicar que la fibra no se arrancó, quizá debido a la mayor longitud de fibra, que también explica la poca presencia de vestigios de matriz desprendida. Aquí, pudo haber ocurrido un desprendimiento post falla, que mostró la fibra sin haber ocurrido arrancamiento significativo. Adicionalmente se observa una superficie de fibra irregular, debida a su constitución de pequeñas fibras agregadas. Esta irregularidad superficial resulta favorable con la adhesión mecánica entre la fibra y la matriz debido a que incrementa la rugosidad superficial de la fibra (Franco et al. 2013). Esta adhesión se puede observar en la figura 4 (b), que muestra las huellas dejadas en el momento del fallo, debido a la interpenetración de las dos superficies (Hull, 1987).

Figura 4. Imágenes SEM de la falla de las pastas de cemento con fibras de PVA de 12 mm, a) alrededor de la fibra y b) sobre la fibra. Fuente: elaboración propia, 2009.



Conclusiones

Las fibras ultrafinas agregadas de PVA evaluadas en pastas de cemento portland ultrafino registraron un menor porcentaje de retracción comparadas con las fibras de Polipropileno, sin importar la longitud de las mismas. Algunas fibras de PVA después de la falla, registraron una capa superficial de material cementicio, este fue un indicativo de que hubo mejor adhesión con la matriz cementicia, en comparación con las fibras de PP. Las fibras agregadas de PVA se podrán usar como refuerzo secundario en pastas de cemento portland ultrafino, proporcionando control de la contracción plástica y reduciendo el agrietamiento. Esto permitirá evitar el desmejoramiento de algunas propiedades como la resistencia a la flexión y compresión, y mejorar la durabilidad e integridad a largo plazo de las pastas de cemento.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo, que permitió desarrollar esta investigación, del Centro de Excelencia de Nuevos Materiales (CENM), así como al Grupo Materiales Compuestos (GMC), de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle y a la Universidad Politécnica de Valencia (España). Edgar Franco agradece el apoyo económico de Colciencias a través de la beca de doctorados nacionales.

Referencias

- BASF. (2006). BETTORFIBER 6, 12, 18 Retrieved 10.03.2009, from http://rdtrioja1.e.telefonica.net/fichatecnica/aditivos/bettorfiber_f.pdf
- Cornejo, L. (2007). Nuevas Tendencias en los Revestimientos de Túneles. *Revista de Obras Públicas*, 154(3473), 10-11.
- Davidson, J., Thomas, C., & Farrell, G. (2008). PVA Fiber Reinforced Shotcrete for Rehabilitation and Preventative Maintenance of Aging Culverts Retrieved 13.11.2012, 2013, from <http://www.eng.auburn.edu/files/centers/hrc/930-657.pdf>
- Fong, H. (2004). Electrospun nylon 6 nanofiber reinforced BIS-GMA/TEGDMA dental restorative composite resins. *Polymer*, 45(7), 2427-2432.
- Franco, E., Delvasto, S., Zuluaga, F., & Amigó, V. (2013). Morphological and mechanical response characterization of nanofiber aggregates of PVA produced by electrospinning sol-gel process. *DYNNA*, 80(178), 109-114.
- Franco, E., Delvasto, S., Zuluaga, F., & Marti, F. (2009). Caracterización del haz proyectado en el proceso de electrohilado de PVA. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, S1(3), 1097-1103.
- Guerrini, L. B., M; Bretas, R. (2006). Eletrofiacção do Poli (álcool vinílico) Via Solução Aquosa. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 16(004), 286-293.
- Haiying, W., Lu, X., Zhao, Y., & Ce, W. (2006). Preparation and characterization of ZnS:Cu/PVA composite. *Materials Letters*, 60(20), 2480-2484.
- Hull, D. (1987). *Materiales Compuestos*. Barcelona: Reverte S.A.
- Kaufmann, J., Winnefeld, F., & Hesselbarth, D. (2004). Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 541-549.

- Kin, J., & Reneker, G. (1999). Mechanical properties of composites using ultrafine electrospun fiber. *Polymer Composites*, 20(1), 124-131.
- Koski, A., Yim, K., & Shivkumar, S. (2004). Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning. *Materials Letters*, 58(3-4), 493-497.
- Li, L., & Hsieh, L. (2006). Chitosan bicomponent nanofibers and nanoporous fibers. *Carbohydrate Research*, 341(3), 374-381. doi: 10.1016/j.carres.2005.11.028
- Li, V. (2003). Durable Overlay Systems with Engineered Cementitious Composites (ECC). *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 9(2), 215-234.
- Rendon, C., Li, V., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T., & Ogawa, A. (2001). Measuring and modifying interface properties of PVA fibers in ECC matrix. *Materials in civil engineering*, 13(6), 399-406.
- Santos, S. (2008). *Evaluation of the mechanical behaviour by measuring the energy of fracture and impact energy of fibre-cements*. Paper presented at the 11 th Int. Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference, November 5-7, Madrid.
- Tang, J. Y., Jian, G., Hua, G. X., Yong, K. H., Jiong, D., & Yuan, S. X. (2007). Fabrication and characterization of poly (vinyl alcohol)/chitosan blend nanofibers produced by electrospinning method. *Carbohydrate Polymers*, 67(3), 403-409.
- S.T. Tassew, A.S. Lubell. (2014). Mechanical properties of self consolidating concrete blended with high volumes of fly ash and slag. *Construction and Building Materials* 51, 215-224
- Wang, S., & Li, V. (2003). Tailoring of PVA Fiber/Matrix Interface for Engineered Cementitious Composites (ECC) Retrieved 23.11.2008, from <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/84747/ShuxinFiber2003.pdf?sequence=1>
- Wang, S., & Li, V. (2006). Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances Retrieved 22.01.2010, from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.67.4523&rep=rep1&type=pdf>
- Weimann, M., & Li, V. (2003). Hygral Behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC). 9(5), 513-534.