

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Desempeño de compuestos con fibras de alcohol polivinílico y nano-fibras/tubos de carbono

Joshua Hoheneder^(1,2), Ismael Flores-Vivian^(1,3), Lourdes Vergara-Alvarez⁽³⁾
y Konstantin Sobolev⁽¹⁾

⁽¹⁾ Department of Civil Engineering and Mechanics, University of Wisconsin-Milwaukee, USA

⁽²⁾ Pierce Engineers, INC., Milwaukee, WI, 53202, USA

⁽³⁾ Universidad Autónoma de Nuevo León, Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, 66455 Nuevo León, México

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6473>

RESUMEN

La adición de fibras en morteros compuestos a base de cemento portland es una práctica común para la prevención de la formación de grietas y para incrementar la resistencia a la flexión. En esta investigación, se estudiarán morteros Compuestos Fibro-Reforzados (CFR) con Fibras de Alcohol Polivinílico (FAP), reforzadas con Nanofibras de Carbono (NFC) o Nanotubos de Carbono (NTC) para el desarrollo de sistemas de Supervisión de la Salud Estructural (SSE). Los especímenes fabricados fueron ensayados a la resistencia a la flexión, absorción de agua y a la conductividad eléctrica en agua o en solución con NaCl. Los resultados demostraron una dependencia de los especímenes al tipo de solución a la cual fueron expuestos. Se demostró que la sensibilidad a la deformación y a la solución de NaCl puede ser incrementada por la adición de los NTC. Los resultados en el incremento de la conductividad con los compuestos de NTC pueden ser escalables para las aplicaciones de monitoreo no-destruccion en estructuras de autodetección de concreto que requieran una mejora integral bajo las cargas aplicadas y estabilidad en ambientes deletéreos.

PALABRAS CLAVE: nanofibras, nanotubos, compuestos, conductividad eléctrica, resistencia a la flexión.

1.- INTRODUCCIÓN

El concreto es el material más utilizado en todos para proyectos de construcción; sin embargo, es propenso a microfisuración debido a la carga de servicio, lo que puede conducir al aumento progresivo de la permeabilidad y al deterioro del refuerzo. La supervisión constante de las condiciones de estructura para la formación y propagación de grietas, así como la detección de la entrada de cloruro, es una opción atractiva que puede reducir los costos de inspección y aumentar el ciclo de vida de la misma. La inspección visual de la formación de grietas en las estructuras es costosa, subjetiva, y los elementos en

una estructura pueden ser inaccesibles o inseguros. Los sistemas de Supervisión de la Salud Estructural (SSE) avanzados pueden utilizar Concreto Reforzado con Fibra (CRF) para propósitos de autodetección y monitoreo. Los materiales comunes utilizados para fabricar Compuestos Fibro-Reforzados (CFR) son fibras de vidrio y acero con algunos nuevos materiales tales como Fibras de Alcohol Polivinílico (FAP), Nanofibras de Carbono (NFC) y Nanotubos de Carbono (NTC). Se han utilizado fibras de FAP para mejorar la respuesta bajo carga de flexión [1] [2]. Las fibras de acero y carbono son eléctricamente conductoras, lo que ayuda a mejorar la conductividad de los materiales cementosos [3] [4]. Los compuestos NTC y NFC pueden servir como sensores de deformación [5]. La capacidad de autodetección de deformación es causada por el cambio en la resistividad eléctrica del volumen del concreto bajo carga dinámica o estática. El concreto auto-detectable es un componente importante de los edificios inteligentes: las estructuras que pueden detectar posibles fallas antes de alcanzar el umbral de deterioro crítico pueden salvar vidas y reducir las cargas financieras para los propietarios de edificios.

Se han utilizado NFC para mejorar las propiedades mecánicas y eléctricas del concreto [6], especialmente para aumentar la resistencia a la flexión, la tenacidad a la flexión y reducir la contracción por secado. Las nanofibras de carbono uniformemente dispersas en una matriz de concreto permiten el puenteo de las microfisuras, lo que hace que el espacio aislado sea eléctricamente conductor [7]. Por esta razón, es importante dispersar uniformemente las fibras dentro de la mezcla. El mayor grado de dificultad asociado con la dispersión de NTC se debe a la fuerza de atracción de van der Waals interactuando entre los NTC [8]. El contenido de fibras debe mantenerse por debajo del umbral de percolación para asegurar una alta resistencia a la compresión, capacidad de trabajo y reducir los costos de material [9]. En este trabajo se investigaron los CRF con FAP y NFC/NTC para medir su resistencia a la flexión, absorción de agua y conductividad eléctrica en agua o en solución de cloruro sódico para el desarrollo de sistemas SSE.

2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se usó cemento Portland ASTM-C105 de tipo I (Lafarge North America) y arena de sílice graduada estándar ASTM-C778 (US Silica Co, Ottawa, IL). Se añadió a la mezcla un aditivo reductor de agua de alto rango (policarboxilato PCE de Handy Chemicals Montreal, Canadá) a una dosificación en peso de cemento. Se incorporaron en todas las mezclas FAP (Kuralon K-II de Kuraray, Japón) para aumentar la resistencia a la flexión y las NFC PR-24-XT-PS (Pyrograf Products) o los NTC (Eden Nanomaterials) para aumentar la conductividad eléctrica.

La relación de agua a cemento (a/c) utilizada para las mezclas experimentales fue de 0.3. Esto se hizo para mantener un mortero denso con poco vacío de aire eléctricamente aislantes para permitir el libre flujo de corriente eléctrica en el sistema. Se utilizó arena de sílice a una relación de arena a cemento (s/c) de 0.5. La composición de las muestras ensayadas se muestra en la **Tabla 1**. La comparación del rendimiento de los compuestos de FAP-CRF con nanofibras de carbono o nanotubos, NFC o NTC, respectivamente, se realizó con una mezcla de referencia (Ref).

Tabla 1 Proporciones de mezclas de los compuestos investigados.

<i>Composición</i>	<i>Ref</i>	<i>NFC</i>	<i>NTC</i>
SP, % w cemento	0.175	0.175	0.236
FAP, % vol	2	2	2
NFC, %vol	0	0.2	0
NTC, %vol	0	0	0.2

Para realizar el concepto propuesto de CRF autodetectable, es importante la distribución uniforme de fibras / tubos de carbono dentro de la matriz de cemento [10]. La dispersión de las NFCs / NTCs se hizo antes de sumarlos en el CRF autodetectable. En un trabajo previo [10] se pueden encontrar detalles del procedimiento de dispersión de las NFC en agua utilizando un superplastificante basado en PCE y tratamiento con ultrasonidos. La dispersión apropiada de NTC en agua se consiguió mediante el mismo procedimiento utilizado para las NFC, adicionando la cantidad de 5% de arena de sílice de la mezcla total del compuesto. Se añadió una porción (75%) del agua al recipiente del mezclador Hobart HL-200 de 20 litros con arena de sílice y se mezcló a baja velocidad (107 rpm) durante 30 segundos. Después de mezclar la arena y el agua, se añadieron la mitad de las FAP y se mezclaron durante 30 segundos a baja velocidad. Una vez que se completó, el resto de las fibras se añadieron y se mezclaron a la misma velocidad durante 30 segundos adicionales. La mitad del cemento portland se añadió a la mezcla durante 30 segundos a baja velocidad, seguido por la segunda mitad a la misma velocidad. Se añadió la dispersión del 25% de agua, PCE y NFC (o NTC) y se mezcló a baja velocidad durante 30 segundos y luego durante otros 30 segundos a velocidad media (198 rpm).

Una vez que se mezcló el FAP-CRF, se moldearon los especímenes de 14 x 40 x 160 mm utilizados para ensayos de flexión. Las muestras se colocaron en los moldes en dos capas. Cada capa se compactó mediante un pizón de caucho (dimensiones 13 x 25 x 152 mm). Después de la compactación, las muestras fueron compactadas por 20 gotas en una mesa de vibración y vibraron durante 30 segundos en una mesa vibrante. Después de compactar las muestras, las muestras se curaron en moldes durante 24 horas a 23 °C y 95% de humedad relativa. Después de 24 horas, las muestras fueron desmoldeadas y curadas en agua saturada de cal a 23 °C durante 14 días. Después del procedimiento de curado, los especímenes se secaron a 90 °C durante 24 horas antes de la instalación de los electrodos. Los especímenes fueron probados para evaluar su resistencia a la flexión y la conductividad. La resistencia a la flexión se realizó mediante una prueba de flexión de cuatro puntos con una máquina de ensayo universal (Instron 3369). Los rodillos de carga del punto superior se colocaron separados 40 mm, mientras que los rodillos de carga inferiores estaban espaciados a 120 mm de las muestras para detectar el agrietamiento. Los especímenes se ensayaron hasta el fallo a una velocidad de deformación de 1,2 mm por minuto para observar el cambio en la conductividad. La adquisición de datos HP 34970A (Hewlett-Packard) registró la conductividad de las muestras en intervalos de cuatro segundos.

Los electrodos externos se añadieron a la muestra después de que se les había permitido curar. Los contactos eléctricos se pegaron con "Wire Glue" (Anders Products) a la superficie de la muestra, tanto en los lados de tensión como de compresión. Se colocó una

capa de látex (Daraweld, de WR Grace) y masilla de caucho sobre el pegamento seco para hacer una conexión impermeable firme y externa. Para el experimento informado se eligió el método de prueba DC de dos sondas debido a la instrumentación y facilidad de implementación más sencillas en el campo [7] [9]. Los datos de resistencia eléctrica se midieron directamente para un canal particular y se registraron utilizando la adquisición de datos (HP 34970A de Hewlett-Packard). Cuando se utilizó la prueba de flexión de cuatro puntos, era necesario tener múltiples ubicaciones para electrodos a lo largo del lado cargado en tensión. Se colocaron dos canales de los electrodos a cada lado de la muestra situados a 20 mm (canal 1) y a 40 mm (canal 2). El procedimiento utilizado en el estudio para exponer las muestras a condiciones de humedad se ajustó para cumplir con los requisitos del ensayo ASTM C1202. Después de completarse el procedimiento, se ensayaron muestras para determinar el efecto de las condiciones de humedad sobre la conductividad de las muestras de concreto. Después de exponer las muestras a las condiciones de humedad previstas, fue necesario probar la absorción de las muestras. Antes de la prueba, las muestras se sumergieron en agua o solución de cloruro de Na al 2% durante 24 horas para simular el efecto de diferentes condiciones de exposición. Para determinar la capacidad de flexión de los diseños de mezcla utilizados, los especímenes se ensayaron en cuatro puntos de flexión. El ensayo se llevó a cabo utilizando una máquina de ensayo universal (Instron 3369) a una velocidad de carga de 1,2 mm / minuto. Se comparó el esfuerzo-deformación por flexión y la resistencia eléctrica de los especímenes Referencia-CRF con los materiales compuestos NFC / NTC. Las dos exposiciones permitieron investigar la sensibilidad del compuesto para detectar la presencia de cloruros; por lo tanto, el experimento informado fue diseñado para observar el cambio en la conductividad relativa de especímenes basados en NFC / NTC bajo condiciones de flexión.

3.- RESULTADOS

Las tensiones máximas de flexión logradas se resumen en la **Las** muestras que absorbieron la menor cantidad de humedad bajo ambas exposiciones fueron las muestras de referencia. Las muestras de referencia tenían la misma cantidad de PCE que las muestras que contenían NFC; sin embargo, la adición de NFC y los NTC incrementaron la consistencia de la mezcla con lo cual se podría conducir a la generación de más vacíos y, por lo tanto, a una mayor absorción de agua.

La capacidad del material compuesto para conducir la electricidad depende del contenido de humedad. Para aumentar la capacidad del material compuesto para conducir la electricidad, NTCs y NFCs fueron agregados al diseño de la mezcla. Mediante la adquisición de datos (HP 34970A de Hewlett-Packard) se midió la resistencia del material compuesto para tres condiciones: exposición seca al agua, 24 horas, y exposición al 2% a la solución de cloruro de Na al 2%. Las mediciones se realizaron a través de dos canales de electrodos y los promedios se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 2. Los especímenes de referencia que contenían solamente fibras de FAP tenían la capacidad de flexión más alta. Debido a la alta capacidad de tracción de los NFC y NTCs, la reducción en la capacidad de flexión fue inesperada. La reducción de esta

capacidad se debe probablemente a una distribución desigual del NFC / NTC en la matriz compuesta. La **Tabla 2** muestra la absorción promedio de agua para las muestras. Las muestras que absorbieron la menor cantidad de humedad bajo ambas exposiciones fueron las muestras de referencia. Las muestras de referencia tenían la misma cantidad de PCE que las muestras que contenían NFC; sin embargo, la adición de NFC y los NTC incrementaron la consistencia de la mezcla con lo cual se podría conducir a la generación de más vacíos y, por lo tanto, a una mayor absorción de agua.

La capacidad del material compuesto para conducir la electricidad depende del contenido de humedad. Para aumentar la capacidad del material compuesto para conducir la electricidad, NTCs y NFCs fueron agregados al diseño de la mezcla. Mediante la adquisición de datos (HP 34970A de Hewlett-Packard) se midió la resistencia del material compuesto para tres condiciones: exposición seca al agua, 24 horas, y exposición al 2% a la solución de cloruro de Na al 2%. Las mediciones se realizaron a través de dos canales de electrodos y los promedios se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 2. Resistencia a la flexión y absorción de agua en especímenes

<i>Mezcla ID</i>	<i>Fuerza a flexión (MPa)</i>	<i>Promedio de absorción de humedad (%)</i>
Ref.	13.33	1.13
CNF	10.54	2.86
CNT	12.45	3.11

Tabla 3 Conductividad de las muestras en diferentes medios

<i>Mezcla ID</i>	<i>Conductividad $\Omega^{-1}m^{-1}$</i>					
	<i>Canal 1</i>			<i>Canal 2</i>		
	<i>Seco</i>	<i>Agua</i>	<i>Na Cloruros</i>	<i>Seco</i>	<i>Agua</i>	<i>Na Cloruros</i>
Ref.	7.42E-04	7.60E-03	7.21E-03	7.35E-04	9.47E-03	1.45E-02
CNF	6.42E-04	8.86E-03	1.15E-02	6.66E-04	1.11E-02	1.84E-02
CNT	1.39E-03	8.66E-03	1.16E-02	7.92E-04	1.12E-02	1.58E-02

Cuando se comparan muestras secas de la **Tabla 3**, solo se observa la capacidad natural de los materiales para conducir electricidad. Todas las muestras probadas fueron capaces de conducir la electricidad; sin embargo, las muestras que contenían NTC condujeron la electricidad más eficientemente. Las NFCs / NTCs utilizadas en este trabajo aumentaron la conductividad del material reduciendo la resistividad de los materiales, especialmente para el compuesto NTC. La conductividad del material aumentó en 1,87% y 1,08% para los canales 1 y 2, respectivamente, en comparación con el compuesto de referencia. Los especímenes expuestos al agua durante 24 horas aumentaron la conductividad en 12,88, 16,62 y 23,55% para los compuestos Ref., NFC y NTC, respectivamente. Los especímenes expuestos a una solución de cloruro de Na al 2% durante 24 horas aumentaron la conductividad en 19,77, 27,69 y 29,64% para los compuestos Ref., NFC y NTC,

respectivamente. El aumento de la conductividad fue más evidente en la presencia de NFCs / NTCs para ambas condiciones de humedad. Los especímenes que contienen NTCs aumentaron la conductividad de las muestras, mostrando que estos materiales tienen mayor conductividad eléctrica que los NFCs y los materiales de referencia para ambas condiciones de humedad.

4.- CONCLUSIONES

La técnica propuesta para el monitoreo de elementos estructurales se realizó mediante lecturas de conductividad utilizando un sistema simple de adquisición de datos conectado a electrodos simples. El concepto propuesto tiene ahorros de costos en que no requiere un profesional capacitado para hacer las observaciones in situ, ni posteriores visitas a la obra después de su colocación. Además, el material CRF desarrollado puede utilizarse en forma de piel sensible al estrés con un espesor de 2 - 15 mm incorporado al concreto existente.

La dispersión de las NFCs y los NTCs se realizó mediante el uso de mezcla ultrasónica combinada con el uso de un superplastificante. El CRF basado en FAP expuesto a la solución de cloruro de Na al 2% demostró cambios más altos en la conductividad diferencial que aquellos expuestos solamente al agua. Este cambio en la conductividad relativa se puede observar más definitivamente en la primera grieta en la matriz compuesta y puede utilizarse para la detección de cloruro. Generalmente, las muestras expuestas a cloruros de Na tenían una pendiente más pronunciada de conductividad relativa que la muestra expuesta sólo al agua. Los resultados de este estudio demostraron la capacidad de auto-detección NFC / NTC-FAP basado en CRF para proporcionar un monitoreo sistemático y no imparcial de estructuras de concreto.

REFERENCIAS

- [1] J. S. J. P. Li and R. Deng, "Structure, Mechanical, and Swelling Behaviors of Poly(vinyl alcohol)/SiO(2) Hybrid Membranes," *J. Reinf. Plas. & Comp.*, vol. 29, no. 4, pp. 618-629, 2010.
- [2] Z. Metaxa, M. Konsta-Gdoutos and S. Shah, "Mechanical Properties and Nanostructure of Cement-Based Materials Reinforced with Carbon Nanofibers and Polyvinyl Alcohol (PVA) Microfibers," *ACI SP*, vol. 270, pp. 115-124, 2010.
- [3] D. Chung, "Piezoresistive cement-based materials for strain sensing," *J. Intel. Mat. Sys. & Struc.*, vol. 13, no. 9, pp. 599-609, 2002.
- [4] T. C. Hou and J. P. Lynch, "Electrical Impedance Tomographic Methods for Sensing Strain Fields and Crack Damage in Cementitious Structures," *J. Intel. Mat. Sys. & Struc.*, vol. 20, no. 11, pp. 1363-1379, 2009.
- [5] X. Fu and D. Chung, "Contact electrical resistivity between cement and carbon fiber: its decrease with increasing bond strength and its increase during fiber pull-out," *Cem. & Con. Res.*, vol. 25, no. 7, pp. 1391-1396, 1995.
- [6] J. Li, J. Suo and R. Deng, "Structure, Mechanical, and Swelling Behaviors of PVA/SiO₂ Hybrid Membranes," *J. Reinf. Plas. & Comp.*, 29, 4, pp. 618-629, 2009.

- [7] N. W. L. Ozyurt, T. Mason and S. Shahet, "Monitoring fiber dispersion in fiber-reinforced cementitious materials: Comparison of AC-impedance spectroscopy and image analysis," *Aci Mat. J.*, vol. 103, no. 5, pp. 340-347, 2006.
- [8] D. Wang, W.-X. Ji, Z.-C. Li and L. Chen, "A Biomimetic "Polysoap" for Single-Walled Carbon Nanotube Dispersion," *J. Ame. Ch. Soc.*, 128, 20, pp. 6556-6557, 2006.
- [9] S. Wen and D. Chung, "Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement," *Carbon*, vol. 45, no. 4, pp. 710-716, 2007.
- [10] J. Hoheneder, I. Flores-Vivian, Z. Lin, P. Zilberman and K. Sobolev, "The performance of stress-sensing smart fiber reinforced composites in moist and sodium chloride environments," *Comp. B*, vol. 73, p. 89-95, 2015.