

Capacidad de variación de resistencia eléctrica del hormigón reforzado con fibras de carbono

Carbon-fibre reinforced concrete's electrical resistance variation capacity

Markel Urtiaga Alberdi^a, David Sanz Arauz^b

^a Architect. Universidad Politécnica de Madrid

^b Prof. Dr. Madrid Technical School of Architecture. Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

En esta investigación se ha estudiado la variación de las propiedades mecánicas y eléctricas del hormigón armado con fibras carbono en lugar de barras de acero. Se ha determinado la resistividad eléctrica del conjunto en distintos estados tensionales. En todos los ensayos se ha observado una variación de la resistencia proporcional a la carga. Los datos parecen indicar que la variación de la resistividad en hormigones con fibra de carbono podría emplearse como un indicador del esfuerzo de trabajo, pudiendo ser objeto de un futuro desarrollo de sensores para monitorización de estructuras.

ABSTRACT

This research is focused on the study of the variation of mechanical and electrical properties of carbon-fibre reinforced concrete, instead of steel reinforcement. Electrical resistivity has been determined for different tensile states. A variation of electrical resistance proportional to the strain has been observed in all the assays. The data seems to indicate that electrical resistivity variation in carbon-fibre reinforced concrete could be used as an indicator of strain and it can be prone to become a sensor for structure monitoring with further development.

PALABRAS CLAVE: hormigón, UHPC, fibra de carbono, resistencia eléctrica, variación de resistencia.

KEYWORDS: concrete, UHPC, carbon-fiber, electrical resistance, resistance variation.

1. Introducción

La tendencia actual en el mundo de la construcción empleando hormigón se enfoca reducir costes tanto económicos como ambientales. Por ello, se tiende a desarrollar hormigones que sean cada vez más eficaces mediante, por ejemplo, el añadido de fibras [1,2]. Así, la investigación del hormigón ahonda también en la búsqueda de nuevas ventajas aportadas por la adición de estas fibras, como la posibilidad de ser aislantes térmicos o conducir instalaciones, lo que llevaría asociado una mayor reducción de costes [3].

Los hormigones con resistencia a compresión por encima de 150 MPa se consideran hormigones de ultra elevado rendimiento (UHPC por sus siglas en inglés) y precisamente esta elevada resistencia es debida en parte al uso de fibras [4]. De éstas, las más empleadas son las de carbono y las de acero por suponer la mejor relación entre resultados y costes [5]. Sobre la función añadida mencionada anteriormente, el añadido de fibras de carbono o acero ofrece además la oportunidad de que el hormigón sea conductor de la electricidad,

campo que ha sido objeto de múltiples estudios [6,7].

La conductividad del hormigón reforzado con fibras de carbono varía aproximadamente en $1000 \Omega \cdot m$ dependiendo de la cantidad de fibras, mezcla de la matriz, dispersión y otros factores [8]. En todos los casos esta conductividad es insuficiente para el paso de instalaciones eléctricas. Sin embargo, otros usos como los derivados de la posibilidad de variar la resistencia eléctrica sí resultan de interés.

Esta investigación pretende averiguar la utilidad de reforzar el hormigón con fibra de carbono para obtener un producto que, además de mejorar su resistencia, conduzca la electricidad y, con ello, permita ser su propio sensor para determinar el esfuerzo al que está siendo sometido. Por tanto, son objetivos de este estudio determinar el grado de mejora de las propiedades mecánicas, estimar el módulo de elasticidad de este hormigón, observar la capacidad de variación de la resistencia eléctrica y determinar cómo se relaciona ésta con la variación de la carga.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Las probetas empleadas en este estudio se elaboraron con una mezcla de cemento Portland (CEM I 42.5 R) al que se añadieron arena (2.4 partes por cada parte de cemento) y grava de machaqueo (2.16 partes por cada parte de cemento) silíceas y agua (0.6 partes por cada parte de cemento). Estos materiales fueron proporcionados por el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM).

Las fibras de carbono se obtuvieron de la casa comercial Feroqa, y fueron suministrados en forma de tela de fibra de carbono, sin

adhesivos. Estas fibras que contenía la tela fueron deshinchadas y posteriormente cortadas con tijeras específicas, de manera que su longitud fuera de 5 mm tal como muestra la Figura 1. El valor de la resistividad eléctrica del carbono es de $3.0 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m$ [9].



Figura 1. Fibras antes de ser añadidas a la mezcla (elaboración propia)

Las proporciones empleadas en las mezclas se basaron en estudios previos [10] y son las detalladas en la Tabla 1 y fotografiadas en la Figura 2. Las probetas fueron hechas en moldes de 4x4x16 cm que fueron retirados tras 24 horas. El tiempo total de curado fue de 14 días. Con el fin de que la conductividad eléctrica del agua no interfiriera en la toma de datos, las probetas fueron introducidas en una estufa para la eliminación de cualquier posible resto de agua durante las 12 horas previas a la realización de los ensayos. Se produjeron seis probetas por mezcla.

Tabla 1. Descripción de las probetas empleadas (elaboración propia)

Código	Porcentaje de fibras	Cantidad de probetas
0	0	6
1	0.3	6
2	0.5	6
3	0.7	6



Figura 2. Probetas tras la rotura (de izquierda a derecha, mezclas 0, 1, 2 y 3) (elaboración propia)

2.2 Métodos

La determinación de las propiedades mecánicas y eléctricas se realizó mediante una campaña de ensayos consistente en la rotura de tres probetas de cada mezcla a compresión y otras tres a flexión en tres puntos con carga puntual centrada, de modo que pudiera obtenerse la media de las tres. En ambos ensayos se empleó la prensa, aunque modificando la capilla (pieza del final del pistón que desciende ejerciendo presión). La velocidad de carga de la prensa es de unos 0.3 MPa/s, por lo que la duración media del ensayo para estos hormigones fue de 70 segundos. El ordenador conectado a la prensa registró en una tabla el tiempo desde el inicio del ensayo, la fuerza ejercida y la deformación de la probeta.

La medición de la resistencia eléctrica, se realizó empleando un polímetro en modo resistencia conectado mediante electrodos a la probeta tal como muestra la Figura 3. Estos electrodos consistían en fibras de carbono más largas de lo habitual insertadas hasta el centro de la probeta y separadas 1 cm entre sí. Se sincronizaron las lecturas del polímetro y de la prensa mediante un sistema de vídeo. Así, la comparación entre el valor de la carga (dada por la prensa) y el valor de la resistencia eléctrica (dada por el vídeo) para un momento determinado del ensayo permitió la obtención de los diagramas tensión-resistencia eléctrica.

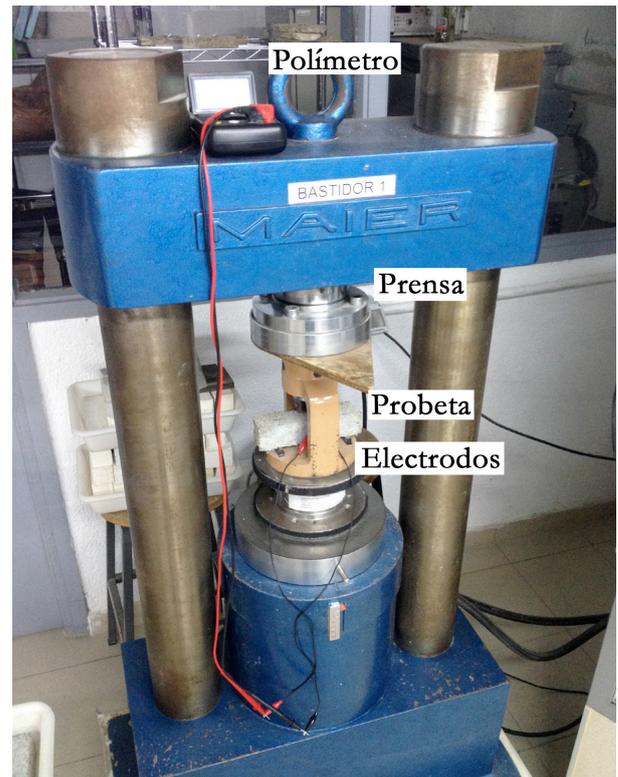


Figura 3. Esquema del ensayo (elaboración propia)

El módulo de elasticidad se estimó tomando elementos diferenciales de tensión y deformación de la curva experimental de los ensayos.

3. Resultados

3.1 Resistencia a compresión

Los resultados de resistencia a compresión fueron de 31.38 MPa para la probeta de control y 22.08 MPa, 27.38 MPa y 21.99 MPa para las mezclas 1, 2 y 3 respectivamente. Esto supone un empobrecimiento de la resistencia a compresión del 29.64% para la mezcla 1, 12.74% para la mezcla 2 y 29.93% para la mezcla 3. En la Figura 4 se han recogido los diagramas que relacionan ambas variables (mezclas 0, 1, 2 y 3 en azul, verde, naranja y gris respectivamente).

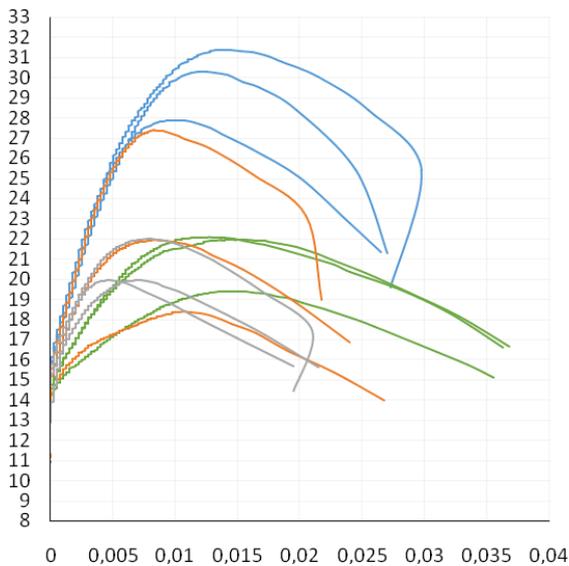


Figura 4. Diagramas tensión-deformación de las probetas rotas a compresión. Abscisas: ϵ (mm/mm) Ordenadas: σ (MPa) (elaboración propia)

3.2 Resistencia a flexión

En lo referente a la flexión, las probetas de control mostraron una tensión máxima de 0.295 MPa, mientras que las mezclas 1, 2 y 3 mostraron 0.298 MPa, 0.478 MPa y 0.285 MPa, lo que supone un incremento del 1.02% para la mezcla 1 y 62.03% para la mezcla 2 y una disminución del 3.39% en la mezcla 3.

3.3 Módulo de elasticidad

Se obtienen los módulos de elasticidad de 36061.11 MPa para la mezcla 0, 28501.33 MPa para la 1, 28049.11 para la 2 y 27038.22 MPa para la 3.

Tabla 2. Resultados de resistencia a compresión, resistencia a flexión y módulo de elasticidad (elaboración propia)

Mezcla	Resistencia media a compresión (MPa)	Resistencia media a flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
0	31.38	0.295	36061.11
1	22.08	0.298	28501.33
2	27.38	0.478	28049.11
3	21.99	0.285	27038.22

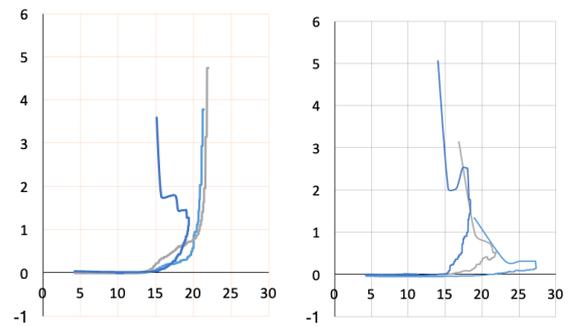


Figura 5 – Diagramas resistencia unitaria-tensión. Abscisas: σ (MPa) Ordenadas: R_t (elaboración propia)

3.4 Propiedades eléctricas

Los valores de resistencia unitaria y tensión fueron medidos en las mezclas 1 y 2 ensayadas a compresión (Figura 5). En las probetas control no se obtuvieron datos de resistencia eléctrica al ser esta nula por la falta de fibras añadidas.

4. Discusión

4.1 Resistencia a compresión

La causa de la reducción en la resistencia a compresión de las mezclas testadas de hormigón con fibras pudiera deberse a la consistencia de la mezcla para su trabajo. Mientras que el hormigón sin fibras utilizado como control con una proporción de agua/cemento 0,6 y sin acceso a fluidificantes presentaba una consistencia fluida previo al fraguado, las tres mezclas con fibras tenían una consistencia seca. Así, se puede suponer que las fibras de carbono absorbieron parte del agua tanto al momento de hacer la mezcla como durante el fraguado, añadiendo porosidad. Por tanto, la combinación de estos factores pudo ser la causa del empobrecimiento de la resistencia a compresión en el hormigón con fibras observado experimentalmente.

La Figura 4 muestra que las probetas de control fueron las más resistentes, como ya se ha mencionado anteriormente. Sin embargo, se observa que las probetas de la mezcla 1 se deforman más antes de la rotura frente a las mezclas 2 y 3 que lo hacen menos. Esto puede ser debido al aumento de porosidad anteriormente descrito, que es lo suficientemente baja en la mezcla 1 para permitir que las fibras se adhieran a la matriz y que ésta pueda deformarse más que las otras mezclas, donde la porosidad es demasiado elevada para que las fibras se adhieran y aporten ductilidad.

4.2 Resistencia a flexión

La resistencia a flexión se incrementó notablemente en el hormigón con fibras de carbono. Esto pudiera ser el resultado del equilibrio entre porosidad y cantidad de fibras mencionado anteriormente. En la mezcla 1 (menor porcentaje de fibra añadida) no parece haber un volumen de fibras suficiente para aportar resistencia mientras que en la 3 (mayor porcentaje de fibra añadida) el volumen de poros pudiera ser demasiado elevado como para que estas fibras se adhieran adecuadamente. La mezcla 2, en cambio, parece estar en equilibrio en este aspecto y ello hace que las fibras aporten resistencia a tracción. Como la flexión se compone de compresión y tracción, y es en este segundo aspecto donde el hormigón resulta más débil, el aporte de las fibras ayuda a la resistencia total a flexión.

4.3 Módulo de elasticidad

Se observa que, cuanto mayor es la cantidad de fibras, menor es el módulo de elasticidad. Esto pudiera deberse a que las fibras aportan mayor ductilidad al hormigón, ya que son capaces de absorber energía cuando el hormigón se microfisura.

4.4 Propiedades eléctricas

La función que relaciona la resistencia eléctrica unitaria con tensión a compresión (Figura 5) es de tipo exponencial en régimen plástico, hecho que es especialmente visible en dos de las probetas de la mezcla 1. Hacia el final de la curva, cuando la rotura es inminente, parece haber un retroceso en la tensión mientras que la resistencia unitaria sigue incrementándose. Éste es el mismo comportamiento que tiene la deformación unitaria frente a la tensión, lo que da pie a relacionar la variación en la resistencia unitaria directamente con las deformaciones internas sufridas por el hormigón.

La deformación bajo tensión produce cambios en la microestructura del hormigón. Cuando existe una tensión, ésta aleja las partículas entre sí, produciendo separaciones entre algunas de las fibras de carbono conductoras. Cuando esto ocurre, la resistencia eléctrica aumenta, ya que vendría a ser el equivalente de reducir la sección conductora. Al reducir la sección de un conductor, manteniendo el material (y por tanto la conductividad) y la longitud, aumenta la resistencia. Por tanto, los cambios en la microestructura provocados por la deformación dan lugar a cambios en la conducción eléctrica, que pueden ser registrados a través de las fibras.

Al estar los cambios en la conducción eléctrica provocados por la deformación, y al ser ésta última linealmente proporcional a la tensión en régimen elástico, se deduce que la variación en la resistencia eléctrica debe a su vez ser linealmente proporcional a la tensión.

5. Conclusiones

Basándose en los resultados obtenidos, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- I. Se produjo una mejora significativa de la resistencia a flexión en la mezcla de 0.5% de fibras de carbono.
- II. La adición de fibras de carbono reduce en torno a un 30% la resistencia a compresión del hormigón.
- III. Las propiedades mecánicas están directa y significativamente relacionadas con la relación entre porosidad y cantidad de fibras, por lo que el uso de fluidificantes es prácticamente imperativo.
- IV. El hormigón reforzado con fibras de carbono conduce la electricidad y varía su resistencia eléctrica proporcionalmente a la carga que soporta.
- V. Existen mezclas desaconsejables para su uso ya que, o bien no mejoran la resistencia del hormigón, o bien no sirven para medir adecuadamente la carga. La mezcla 2 (0.5% de carbono) sería la más adecuada para el primer propósito, mientras que la mezcla 1 (0.3% de carbono) sería la más adecuada para el segundo.

Como conclusión global, sería posible desarrollar un hormigón que permita, mejorando su capacidad de carga y por tanto abaratando costes, realizar otra función como la medición de la carga que soporta, que podría resultar particularmente útil en aquellas situaciones en las que, por la dificultad de la obtención de los valores de las cargas, se tiende a sobredimensionar la estructura, encareciendo así sus costes.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal y dirección del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la ET de Arquitectura de la UPM por su colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang, A review on ultra high performance

concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*. 101 (2015) 741-751.

- [2] R. F. Zollo, Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*. 19 (1997) 107-122.
- [3] C. Y. Tuan, S. A. Yehia, Implementation of conductive concrete overlay for bridge deck deicing at Roca, Nebraska. *Civil Engineering Faculty Proceedings & Presentations*. 3 (2004).
- [4] A. M. Brandt, Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*. 86 (2008) 3-9.
- [5] C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang, A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, 101 (2015) 741-751.
- [6] D. Chung, Carbon-fiber cement-matrix composites". *TANSO*. 190 (1999) 300-312.
- [7] D. Chung, Self-monitoring of fatigue damage in carbon-fiber reinforced cement. *Cement and Concrete Research*. 268(1) (1996) 15-20.
- [8] D. Chung, Carbon-fiber cement-matrix composites". *TANSO*. 190 (1999) 300-312.
- [9] D. Chung, Carbon-fiber cement-matrix composites". *TANSO*. 190 (1999) 300-312.
- [10] D. Chung, Self-monitoring of fatigue damage in carbon-fiber reinforced cement. *Cement and Concrete Research*. 268(1) (1996) 15-20.