

# Comportamiento en estado fresco de los hormigones autocompactantes reforzados con fibras

*Fresh state behavior of self-compacting fibre reinforced concrete*

Gemma Rojo-López<sup>\*, a</sup>, Belén González-Fonteboa<sup>b</sup>, Fernando Martínez-Abella<sup>c</sup>,

Javier Eiras-López<sup>d</sup>

<sup>a</sup> PhD Student, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. [gemma.rojo@udc.es](mailto:gemma.rojo@udc.es)

<sup>b</sup> Associate Prof. Dr. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. [bfonteboa@udc.es](mailto:bfonteboa@udc.es)

<sup>c</sup> Chair Prof. Dr. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. [fmartinez@udc.es](mailto:fmartinez@udc.es)

<sup>d</sup> Associate Prof. Dr. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. [jeiras@udc.es](mailto:jeiras@udc.es)

## RESUMEN

Este trabajo se estudia el comportamiento fresco los hormigones autocompactante reforzados con fibras (FRSCC) a través de dos ensayos reológicos: *Flow Curve Test* (FCT) y *Stress Growth Test* (SGT). Se diseñan diferentes mezclas utilizando diferentes volúmenes de pasta con una cantidad de 1,8% de fibras (respecto al volumen de áridos gruesos). Las fibras utilizadas son de diferentes materiales (plásticas y metálicas) y presentan diferentes características físicas (diámetro y longitud) siendo la ratio longitud - diámetro una de las variables que más afecta al comportamiento en estado fresco del hormigón.

## ABSTRACT

This work studies the fresh behaviour of fibre reinforced self-compacting concretes (FRSCC) through two rheological tests: Flow Curve Test (FCT) and Stress Growth Test (SGT). Different mixtures are designed using different paste volumes with an amount of 1.8% fibres (to the volume of coarse aggregates). The fibres used are made of different materials (plastic and metal) and have different physical characteristics (diameter and length), the ratio length to diameter being one of the variables that most affects the fresh behaviour of the concrete.

**PALABRAS CLAVE:** Hormigón autocompactante (HAC), fibras, reología, ratio de aspecto

**KEYWORDS:** Self-compacting concrete (SCC), fibre, rheology, aspect ratio

## 1. Introducción

El hormigón autocompactante se coloca bajo su propio peso sin necesidad de vibraciones externas y sin riesgo de segregación. Definido inicialmente a finales de los años setenta y principios de los ochenta, fue investigado ampliamente a lo largo de los años [1] [2]. Una de sus principales características es su menor robustez [3], por lo que pequeños cambios en la

dosificación de la mezcla pueden producir grandes cambios tanto en las propiedades del estado fresco como endurecido.

Por otro lado, en secciones muy congestionadas de armadura, donde el flujo de hormigón puede verse bloqueado por las barras de acero, es posible introducir fibras para facilitar el flujo y reducir la cantidad de armadura

necesaria. La combinación de hormigón autocompactante (HAC) y refuerzo de fibras crea nuevas posibilidades en la industria de la construcción, pero el hecho de introducir fibras en la mezcla, estas introducirán cambios importantes en el comportamiento del hormigón fresco [4]. Además, altos contenidos de fibra tienden a formar grumos o bolas que afectan significativamente a la reología del hormigón.

La incorporación de fibras puede también causar dificultades en la mezcla, transporte, colocación y compactación, lo que puede provocar huecos en el hormigón endurecido, afectando al comportamiento del hormigón endurecido. Esto representa un compromiso entre las propiedades mecánicas en estado endurecido y la fluidez en estado fresco [5]. De hecho, el comportamiento del hormigón autocompactante reforzado con fibras (HACRF) depende en gran medida del tipo de fibra, su material y sus propiedades geométricas [6].

Es por esto que, diferentes estudios analizan el efecto de la incorporación de fibras sobre el comportamiento en fresco de morteros o pastas. Sin embargo, el efecto sobre los hormigones autocompactantes, donde se utilizan áridos gruesos, no ha sido estudiado a fondo.

En este sentido, la reología es una potente herramienta para caracterizar la fluidez del hormigón [7], siendo la tensión de flujo estática, la tensión de flujo dinámica y la viscosidad las principales propiedades reológicas a medir. Por lo tanto, en este trabajo se estudia el HACRF utilizando la reología como herramienta de estudio.

La idea del programa de investigación es caracterizar la influencia del tipo de fibra (material, forma, cantidad...) en las propiedades reológicas del HACRF. Para lograr este objetivo se utilizaron dos tipos de fibra con diferentes niveles de pasta en HAC.

## 2. Materiales

Los materiales pulverulentos utilizados en esta investigación fueron: cemento Pórtland CEM I 52,5 N-SR5, filler calizo (LP) y metakaolin (MK). LP y MK fueron utilizados para reemplazar parcialmente el cemento ( **Figura 2-a, b, c**). Los porcentajes de sustitución en volumen fueron de 25% y 15% respectivamente resultando mezclas ternarias con 60%CEM+25%LP+15%MK. Las propiedades físicas de los materiales finos pueden verse en **Tabla 1**

**Tabla 1. Propiedades de los finos.**

|                               | CEM  | MK   | LP   |
|-------------------------------|------|------|------|
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | 3.04 | 2.55 | 2.64 |
| BET (m <sup>2</sup> /g)       | 1.36 | 4.25 | 1.44 |

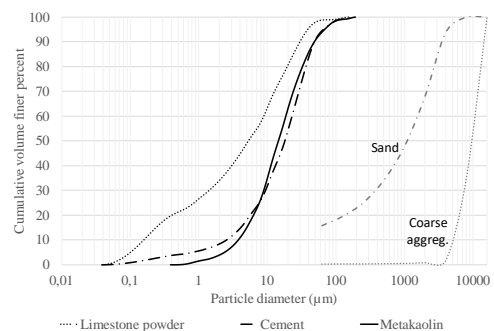
Además, se utilizaron dos fracciones de áridos diferentes: un árido fino (0-4mm) y un árido grueso (6-12mm). Las propiedades físicas de los áridos, pueden verse en la **Tabla 2**.

**Tabla 2. Propiedades de los áridos.**

|                               | Arena | Gravilla |
|-------------------------------|-------|----------|
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.72  | 2.81     |
| Absorción de agua 24h (%)     | 1.05  | 0.63     |
| LA (%)                        | -     | 18       |
| EA (%)                        | 73    | -        |

La **Figura 1** se muestra la distribución granulométrica de los mismos.

En la mezcla se empleó agua potable y un aditivo superplastificante policarboxilato.



**Figura 1. Granulometría**

Tabla 3. Propiedades de las fibras.

|                 | Longitud (mm) | Diámetro (mm) | Ratio de aspecto (l/d) | Material      | Superficie |
|-----------------|---------------|---------------|------------------------|---------------|------------|
| Dramix 3D 45/50 | 50            | 1.05          | 45                     | Acero         | Brillante  |
| Sika Fibre T    | 48            | 0.93          | 60                     | Polipropileno | Rugosa     |

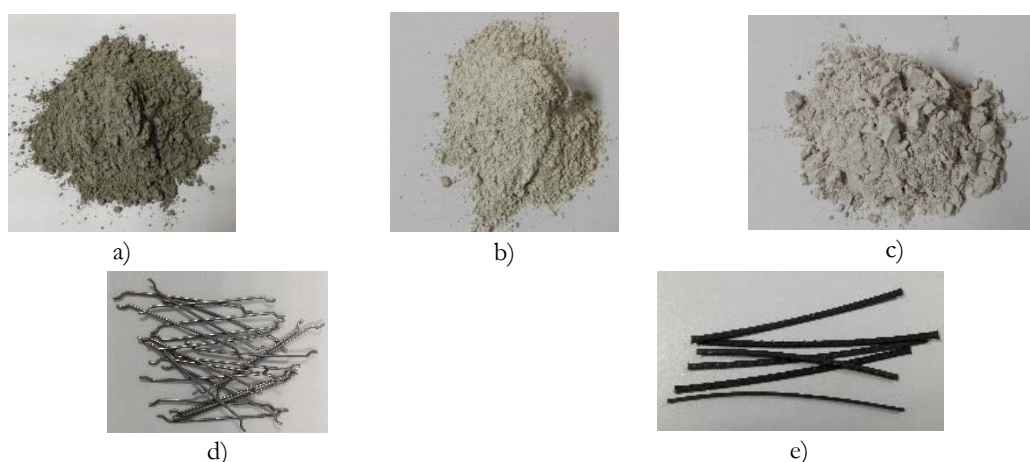


Figura 2. a) CEM, b) LP, c) MK, d) Fibra de acero (S), e) Fibra de polipropileno (PP)

Tabla 4. Dosificaciones (kg/m<sup>3</sup>).

|             | CEM   | LP    | MK   | Arena | Gravilla | Super | Agua  | S    | PP  |
|-------------|-------|-------|------|-------|----------|-------|-------|------|-----|
| 350L-0      | 302.4 | 109.4 | 63.5 | 875.6 | 907.3    | 5.21  | 193.6 | 0.0  | 0.0 |
| 350L-1,8%PP | 302.4 | 109.4 | 63.5 | 875.6 | 891.0    | 5.21  | 193.4 | 0.0  | 5.3 |
| 350L-1,8%S  | 302.4 | 109.4 | 63.5 | 875.6 | 891.0    | 5.21  | 193.4 | 45.9 | 0.0 |
| 400L-0      | 345.5 | 125.0 | 72.6 | 808.3 | 837.5    | 5.96  | 218.1 | 0.0  | 0.0 |
| 400L-1,8%PP | 345.5 | 125.0 | 72.6 | 808.3 | 822.5    | 5.96  | 218.0 | 0.0  | 4.9 |
| 400L-1,8%S  | 345.5 | 125.0 | 72.6 | 808.3 | 822.5    | 5.96  | 218.0 | 42.4 | 0.0 |
| 450L-0      | 388.7 | 140.6 | 81.6 | 740.9 | 767.7    | 6.70  | 242.6 | 0.0  | 0.0 |
| 450L-1,8%PP | 388.7 | 140.6 | 81.6 | 740.9 | 753.9    | 6.70  | 242.5 | 0.0  | 4.5 |
| 450L-1,8% S | 388.7 | 140.6 | 81.6 | 740.9 | 753.9    | 6.70  | 242.5 | 38.9 | 0.0 |

Finalmente, se añadieron dos fibras diferentes: una de acero (S) y una de polipropileno (PP). Las fibras de acero son de alambre trefilado en frío con extremos en forma de gancho, superficie brillante y sin pegamento (**Figura 2-d**). Las fibras PP presentan una superficie modelada y rugosa (**Figura 2-e**). Sus

propiedades geométricas están descritas en la **Tabla 3**.

Como hormigones de referencia se diseñaron tres mezclas diferentes utilizando tres contenidos de pasta diferentes (350L, 400L y 450L) y sin la incorporación de fibras. A cada uno de estos hormigones se añade 1.8% de dos tipos diferentes de fibras, una fibra PP y una

fibra S. Todas las mezclas mantienen los mismos parámetros de dosificación, es decir: Volumen de agua/Volumen de polvo -  $V_w/V_p = 1.1$ ; Árido fino/Árido grueso - Arena/Gravilla =1; superplastificante=1.12%(Volumen sólido/ $V_p$ ); Dosificación de fibras: 1.8% (volumen de áridos gruesos). Las dosificaciones de estudio se muestran en la **Tabla 4**.

### 3. Procedimiento de amasado y ensayo

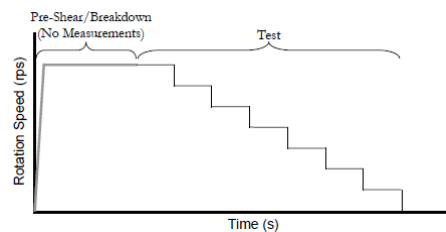
Se preparan amasadas de 36 l con el procedimiento descrito en la **Figura 3**



**Figura 3. Procedimiento de amasado**

Después del amasado, las propiedades reológicas se determinaron utilizando un reómetro portátil con geometría de palas. Se desarrollaron pruebas reológicas a los 10, 30 y 65 minutos a partir del contacto cemento-agua. Las edades de ensayos se corresponden con períodos de reposo de la muestra del reómetro de 5, 15 y 30 minutos, respectivamente.

Se desarrollaron dos ensayos reológicos diferentes, el *Stress Growth Test* (SGT) y el *Flow Curve Test* (FCT) [8]. El SGT se utilizó para determinar la tensión de flujo estática con una velocidad baja y constante (**Tabla 5**) después de un tiempo de reposo fijo. El FCT, descrito en la **Figura 4** y **Tabla 5**, se utilizó para medir la relación entre la tensión de deformación y la velocidad de deformación (valor de par y velocidad de rotación en unidades relativas) y para determinar la tensión de flujo estática y la viscosidad plástica del material ajustando un modelo reológico. En este trabajo se utilizó el modelo Bingham.



**Figura 4. FCT, protocolo de ensayo**

**Tabla 5. Parámetros de ensayo.**

|     | Velocidad (rps) | Meseta (s) |
|-----|-----------------|------------|
| SGT | 0.025           | -          |
| FCT | 0.5             | 20         |

### 4. Resultados y análisis

Se aplicó a los resultados el modelo Bingham de siete puntos obtenidos del FCT en cada uno de los siete pasos de la rampa descendente. Los resultados presentados en la **Figura 4** son los obtenidos a los 10, 30 y 65 minutos de edad. Como era de esperar, todos los hormigones de la serie 350L presentaban un comportamiento reológico de un hormigón vibrado, de hecho, a los 65 minutos se perdió completamente la trabajabilidad y no se pudo realizar el FCT. Las otras dos series, 400L y 450L, mostraron un comportamiento autocompactante.

#### 4.1 Parámetros de la curva de flujo: Tensión de flujo y viscosidad

En la **Figura 6** y **Figura 7** se presentan los parámetros reológicos (tensión de flujo y viscosidad, respectivamente) obtenidos a partir de las curvas de flujo ajustadas con un modelo Bingham.

En cuanto a los resultados del valor de la tensión de flujo, se puede observar que en los hormigones con 350L de pasta, cuando no se utilizan fibras, es menor que cuando se incorporan fibras. Además, es significativamente menor cuando se utilizan fibras de acero que cuando se añaden fibras de PP.

Los resultados de los valores tensión de flujo, obtenidos en las series de hormigones de 400L y 450L, muestran pequeñas diferencias (especialmente en la serie de 450L). Independientemente de que se utilicen o no fibras y del tipo de fibra utilizado, todos los

hormigones presentan valores de rendimiento bajos y similares, una característica típica del comportamiento autocompactante

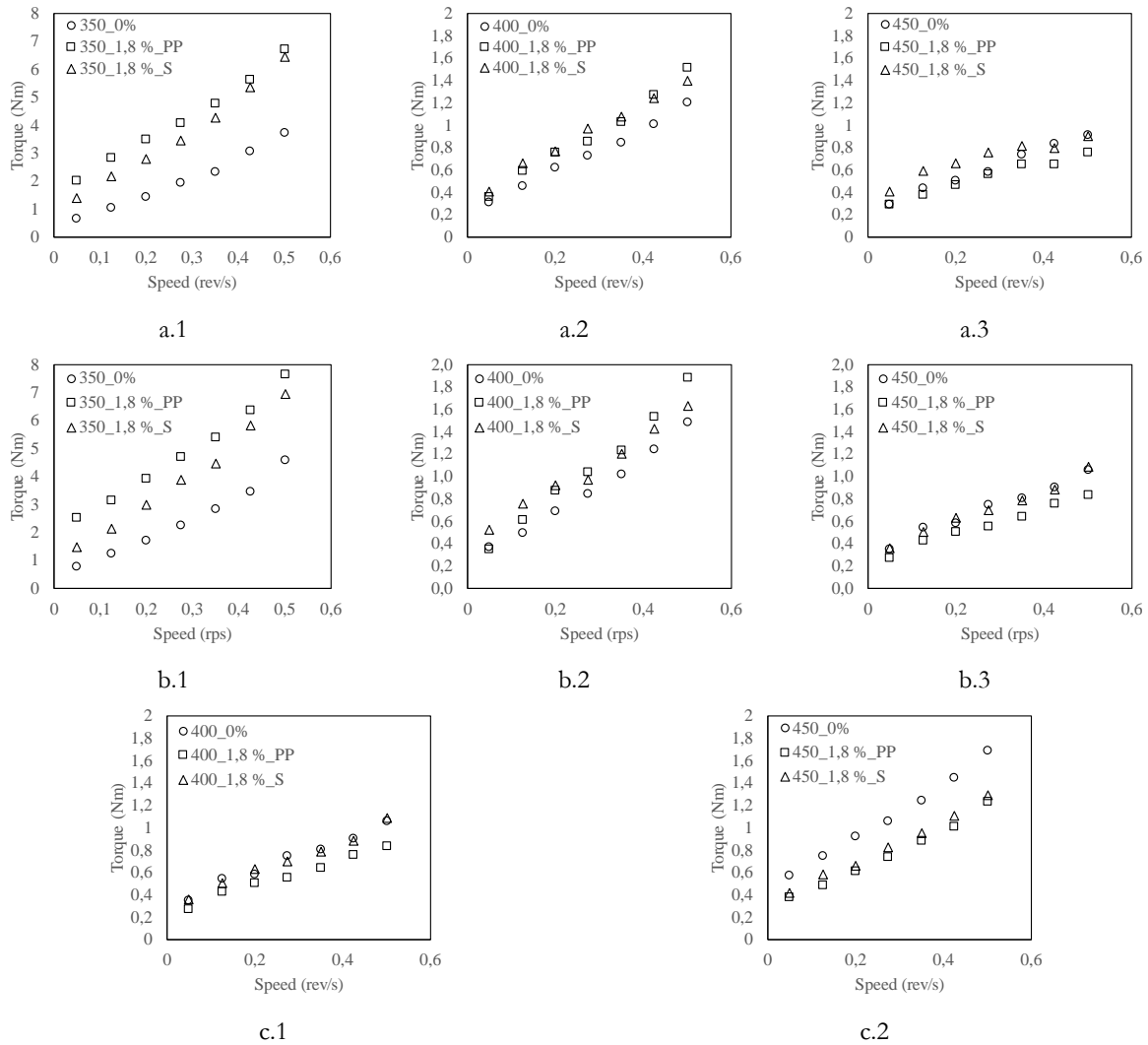


Figura 5. Curvas de flujo a 10 (a), 30(b) y 65 (c) min de edad de las mezclas para 350L (1) 400L (2) 450L (3)

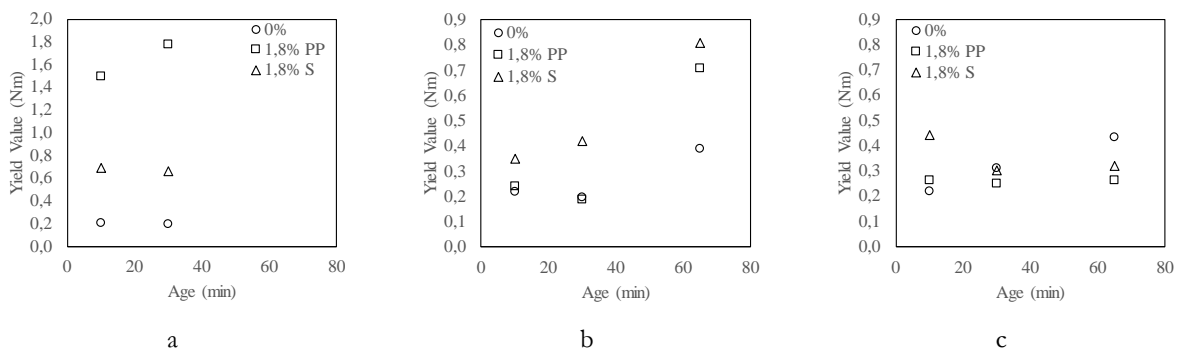


Figura 6. Tensión de flujo para 350L(a) 400L (b) 450L (c)

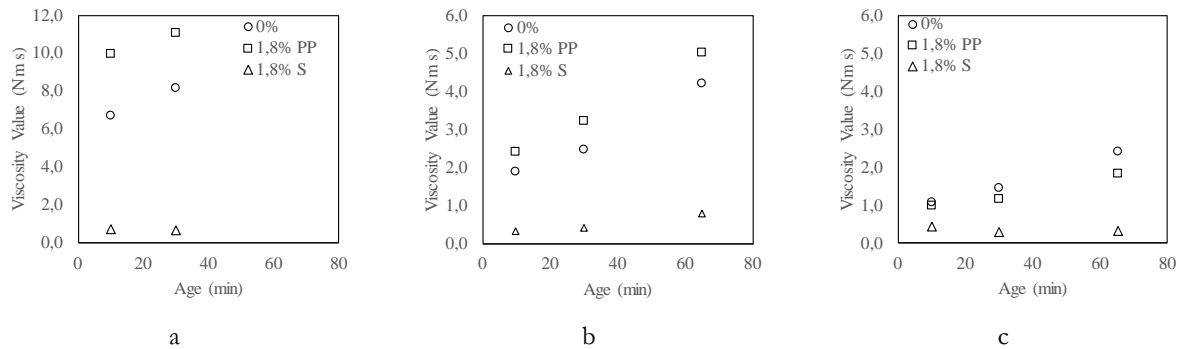


Figura 7. Viscosidad para 350L (a) 400L (b) 450L (c)

En cuanto a los resultados de viscosidad, todas las series de hormigón muestran que el uso de fibra PP da lugar a los valores de viscosidad más bajos (inferiores a la viscosidad medida cuando no se utiliza ninguna fibra y también a los valores obtenidos cuando se incorporan fibras de acero). Las diferencias de viscosidad son más notables en las series de hormigón de 350L que en los hormigones autocompactantes.

#### 4.2 Evolución de los parámetros reológicos

En esta sección se realiza un análisis a lo largo del tiempo, estudiando la evolución de los parámetros reológicos desde los 10 a los 65 minutos de edad.

En cuanto a la serie 350L, la serie de hormigón vibrado, los valores reológicos se obtuvieron a los 10 y 30 minutos de edad. A los 65 minutos de edad fue imposible realizar las mediciones porque la trabajabilidad se había perdido por completo.

En estos hormigones, cuando se incorporan fibras de acero, ambos parámetros reológicos (tensión de flujo y viscosidad) permanecen constantes hasta 30 min, sin embargo, en hormigones con fibras de PP los parámetros son más altos a los 30 min que a los 10 min. Cuando no se utilizan fibras, el valor de tensión de flujo se mantiene mientras que el valor de la viscosidad aumenta.

Analizando los hormigones autocompactantes (series 400L y 450L) se observa que en hormigones de 450L el valor de

la tensión de flujo se mantiene hasta 65 min. En las mezclas de 400L este parámetro se mantiene constante hasta 30 minutos aumentando, sin embargo, a los 65 minutos, con valores ligeramente superiores en las mezclas con fibras de acero.

En cuanto a la evolución de la viscosidad en hormigones autocompactantes, se puede observar que aumenta ligeramente con el paso del tiempo. Cuando no se utilizan fibras y cuando se incorporan fibras de PP, los incrementos son muy similares; sin embargo, cuando se añade fibra de acero, los aumentos de la viscosidad son muy bajos.

#### 4.3 Par máximo

El par máximo se obtiene del SGT como el valor de par máximo alcanzado en los primeros 60 segundos del ensayo. Este ensayo se lleva a cabo después de tres diferentes tiempos de reposo (5, 15 y 30 minutos). Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 8**.

El análisis de este parámetro muestra que todas las series de hormigón presentan una tendencia similar, independientemente del contenido de pasta. Los hormigones sin fibras presentan valores de par más bajos que los hormigones con fibras. Esta tendencia se mantiene en todas las mezclas. A medida que aumenta el tiempo de reposo, también aumenta el par máximo alcanzado en el ensayo.

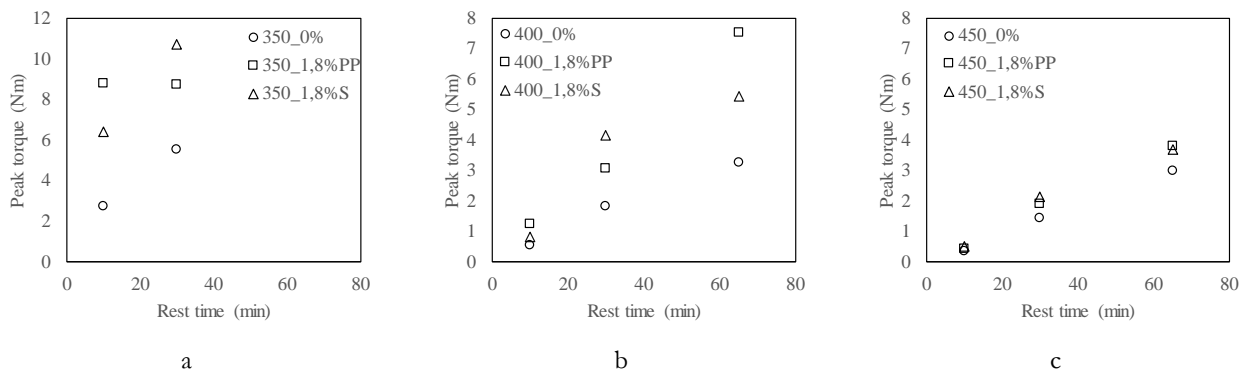


Figura 8. Par máximo para 350L(a) 400L (b) 450L (c)

## 5. Conclusiones

En este estudio, el comportamiento en estado fresco del hormigón autocompactante con fibras de acero y PP se determina mediante ensayos reológicos llevados a cabo con el reómetro comercial ICAR. Se estudia el efecto del contenido en pasta y de la incorporación de diferentes tipos de fibras (acero y polipropileno) en el comportamiento reológico y en la evolución de los parámetros reológicos a lo largo del tiempo. A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Todos los hormigones presentan curvas de flujo que se pueden ajustar según el modelo reológico de Bingham.
- Todos los hormigones, excepto aquellos con un contenido en pasta de 350 L, presentaban un comportamiento autocompactante, independientemente del tipo de fibra. Los hormigones de la serie 350L mostraron un comportamiento fresco típico de un hormigón vibrado.
- La incorporación de fibra modificó los parámetros reológicos (especialmente cuando se utilizan bajo contenido en pasta). La tensión de flujo aumenta

independientemente del tipo de fibra. En cuanto a la viscosidad, la fibra de PP da lugar a valores más bajos, mientras que el uso de fibra de acero da lugar a una viscosidad más alta que la obtenida cuando no se utilizan fibras.

- El análisis de evolución en el tiempo muestra que, en general, los parámetros reológicos (valores de tensión de flujo y viscosidad) aumentan con el tiempo. Los incrementos son más notables en hormigones con bajo contenido de pasta. Además, la incorporación de fibras de acero retrasa el inicio de los incrementos en los parámetros reológicos.

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los siguientes proyectos del programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientado a los Retos de la Sociedad del MINECO: BIA 2014-58063-R (HORREO) y BIA 2017-85657-R (HACCURACEM). Además de una ayuda predoctoral de la convocatoria FPI 2015.

### Referencias

- [1] P. L. Domone, «A review of the hardened

mechanical properties of self-compacting concrete», vol. 29, pp. 1-12, 2007.

- [2] C. Shi, Z. Wu, K. Lv, y L. Wu, «A review on mixture design methods for self-compacting concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 84, pp. 387-398, 2015.
- [3] I. González-taboada, B. González-fonteboa, F. Martínez-abella, y S. Searapaz, «Evaluation of self-compacting recycled concrete robustness by statistical approach», vol. 176, pp. 720-736, 2018.
- [4] A. Conforti, G. A. Plizzari, y R. Zerbino, «Fibre-reinforced Self-Compacting Concrete□: A Review Fibre-reinforced Self-Compacting Concrete□: A Review», 2018.
- [5] L. Martinie, P. Rossi, y N. Roussel, «Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction», *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, n.º 2, pp. 226-234, 2010.
- [6] T. Ponikiewski y J. Katzer, «Properties of fresh SCC mix reinforced by different types of steel and polymer fibre», *Constr. Build. Mater.*, vol. 62, pp. 96-101, 2014.
- [7] J. Eiras-l, «Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour□: Workability and rheology pez PhD Student», vol. 156, pp. 1-18, 2017.
- [8] G. Iris, G. Belén, M. Fernando, y C. Diego, «Self-compacting recycled concrete□: Relationships between empirical and rheological parameters and proposal of a workability box», vol. 143, pp. 537-546, 2017.