

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Influencia de las variaciones en los materiales sobre la reología de hormigones autocompactantes reciclados

I. González-Taboada ⁽¹⁾, B. González-Fontebo ⁽¹⁾, F. Martínez-Abella ⁽¹⁾ y G. Rojo-López ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Civil, Universidade da Coruña, España

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6361>

RESUMEN

Este trabajo se centra en el análisis de la influencia de las variaciones de materiales sobre el comportamiento reológico de los hormigones autocompactantes fabricados con árido grueso reciclado. Se diseña un hormigón autocompactante patrón y tres reciclados con porcentajes de sustitución del 20%, 50% y 100% en volumen. Asimismo, en cada una de estas mezclas se aplican variaciones en el contenido de agua, superplastificante y cemento para simular los errores que se producen en las plantas de fabricación: $\pm 3\%$ en el agua, $\pm 5\%$ en el superplastificante y $\pm 3\%$ en el cemento. Todos los hormigones se estudian en estado fresco mediante los ensayos reológicos *stress growth test* y *flow curve test*. Mediante reógrafos se evalúan los cambios reológicos que los incrementos o decrementos de agua, superplastificante o cemento pueden ocasionar. Los resultados permiten estudiar a qué variación de material es más sensible un hormigón autocompactante reciclado (HACR) y qué porcentajes de árido reciclado sería más recomendable utilizar para obtener un hormigón robusto.

PALABRAS CLAVE: árido reciclado, hormigón autocompactante, reología, composición.

1.- INTRODUCCIÓN

El hormigón autocompactante (HAC) es una nueva clase de hormigón de altas prestaciones que se puede distribuir fácilmente bajo su propio peso y llenar secciones restringidas, o elementos estructurales congestionados por gran densidad de armadura, sin necesidad de emplear la compactación mecánica y sin sufrir ninguna separación significativa de sus componentes (sin segregación) [1].

Los HACs no requieren exigencias específicas en el proceso de fabricación y amasado respecto al hormigón convencional. Acaso el único inconveniente estriba en que el HAC exige mayor control de sus materias primas, pudiendo verse alterado su comportamiento por pequeñas variaciones en la dosificación [2, 3].

Paralelamente, se define como hormigón reciclado (HR) el hormigón fabricado con árido reciclado o con una mezcla de árido reciclado y árido natural [4]. La mayor parte de los estudios consultados se centran en la sustitución de un porcentaje determinado del árido grueso natural por árido reciclado. El uso de las fracciones finas del árido reciclado empeora sustancialmente las propiedades del hormigón, debido a su mayor absorción y demanda de agua [5, 6].

En general, para el control de la absorción del árido reciclado durante el proceso de amasado se puede optar por dos alternativas: presaturar el árido o añadir una cantidad de agua adicional al hormigón durante el amasado [7]. En la primera, el árido se añade después de sumergirse en agua durante un cierto tiempo. En la segunda, el árido se añade en su estado natural considerando que su absorción se manifestará durante la fabricación del hormigón, razón por la cual se añade a la mezcla el agua que el árido absorbe.

Con el objetivo de avanzar en el diseño de hormigones de altas prestaciones y sostenibles aparece el hormigón autocompactante reciclado (HACR), sobre el que existen todavía pocos trabajos [8], la mayoría centrados básicamente en estudiar sus propiedades mecánicas básicas y en el análisis de los requisitos que deben cumplirse para garantizar un adecuado comportamiento en fresco [9, 10].

En este contexto, el presente trabajo plantea el análisis del comportamiento reológico del HACR observando los cambios que se generan cuando, simulando los errores que se producen en las plantas de fabricación, se varían los contenidos de agua, superplastificante o cemento.

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1.- Materiales y hormigones

La pasta de los hormigones se ha fabricado con un cemento CEM-I 52.5 R, un filler calizo como adición y un superplastificante de tercera generación. Los áridos utilizados han sido tres: una arena natural calcárea 0-4 mm, una gravilla granítica 4-11 mm y una gravilla reciclada 4-11 mm obtenida de residuos de construcción y demolición de elementos de hormigón estructural. Se ha observado que en los primeros 10 min absorbe agua hasta el 80% de su capacidad de absorción a las 24 h (Fig. 1).

El conocimiento de las características morfológicas de los áridos es muy importante cuando se estudian las propiedades reológicas del hormigón autocompactante [11]. Por este motivo, se ha estudiado la fracción máxima de empaquetamiento (\emptyset_{\max}) del esqueleto granular de cada hormigón (Fig. 2), resultando bastante similar en todos ellos (Fig. 2).

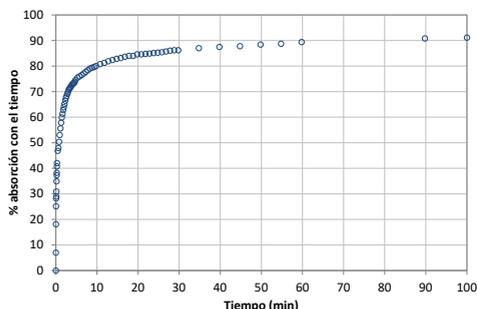


Figura 1. Evolución de la absorción del árido grueso reciclado

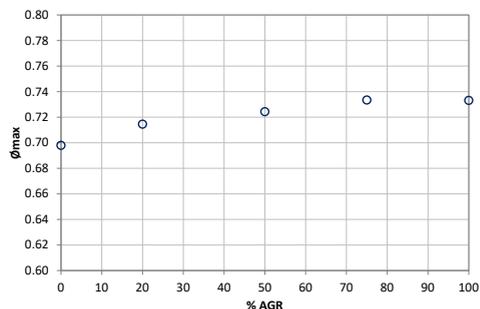


Figura 2. Fracción máxima de empaquetamiento de los diferentes esqueletos granulares

El diseño de los hormigones contempla un hormigón autocompactante de referencia y tres hormigones reciclados de aquel derivados, en los que se sustituye la fracción gruesa natural por el árido reciclado en porcentajes en volumen del 20%, 50% y 100% (Tabla 1). Para tener en cuenta la mayor absorción de la fracción reciclada, durante el amasado se ha añadido una cantidad de agua extra equivalente a su absorción a los 10 min (que supone el 80% de su absorción a las 24 h).

Tabla 1. Dosificación de los hormigones estudiados (1 m³)

Dosificación	0%	20%	50%	100%
Cemento, c (kg)	400.00	400.00	400.00	400.00
Filler, f (kg)	180.00	180.00	180.00	180.00
Agua, a (kg)	184.00	184.00	184.00	184.00
*AFN (kg)	865.59	865.59	865.59	865.59
*AGN (kg)	768.00	614.40	384.00	0.00
*AGR (kg)	0.00	140.40	351.00	702.00
a/c efectiva	0.46	0.46	0.46	0.46
Superplastificante/(c+f) (%)	0.60	0.60	0.60	0.60
a/(c+f)	0.32	0.32	0.32	0.32

* AFN = árido fino reciclado; AGN = árido grueso natural; AGR = árido grueso reciclado

Cada mezcla base (0%, 20%, 50% y 100%) se modificó aumentando o disminuyendo el agua ($\pm A$: -3%, +3%), el superplastificante ($\pm S$: -5%, +5%) y el cemento ($\pm C$: -3%, +3%). Estos porcentajes se seleccionaron por representar las posibles desviaciones en la producción industrial y teniendo en cuenta las tolerancias establecidas por el Eurocódigo.

2.2.- Ensayos realizados

El programa de ensayos ha consistido en la realización de los dos ensayos reológicos habituales: un *stress growth test* y un *flow curve test*. En el primero se aplica una velocidad de rotación baja y constante de 0.025 rps (Fig. 3) hasta alcanzarse el torsor máximo, retirándose seguidamente la pala del reómetro para rehomogeneizar el hormigón. A continuación se introduce nuevamente la pala en el hormigón y se realiza el *flow curve test*. En este segundo ensayo, tras un período de 20 s a una velocidad constante de 0.5 rps (Fig. 4), se miden los torsosres a velocidades decrecientes (desde 0.5 a 0.05 rps en siete escalones).

Este procedimiento se realiza a los 15 min desde el contacto agua-cemento. El *stress growth test* permite determinar la tensión de flujo estática y el *flow curve test* la viscosidad plástica.

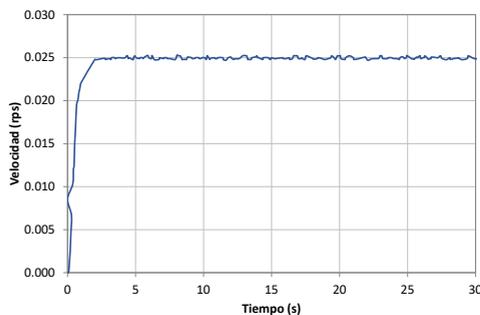


Figura 3. *Stress growth test*

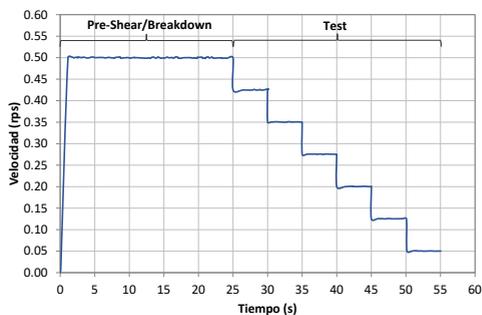


Figura 4. *Flow curve test*

Cada hormigón se fabricó según la secuencia descrita a continuación (Fig. 5). En primer lugar se mezclaron los áridos naturales con el agua extra durante 2 min, dejándose en reposo durante 8 min. A continuación (10 min desde el inicio) se añadió el cemento y el filler. Tras 2.5 min de amasado se añadió el 98.5% del agua, momento que constituye el contacto cemento-agua y considerado por ello el tiempo inicial de referencia para secuenciar los ensayos sobre todos los hormigones. Tras 2 min de amasado se añadieron el superplastificante y el agua restante, continuando el amasado otros 3 min tras los que se dejó el hormigón en reposo durante 2 min. Transcurridos estos se amasó de nuevo durante 2 min más, y a continuación se vertió el hormigón en el recipiente del reómetro quedando en reposo hasta el tiempo de ensayo establecido.

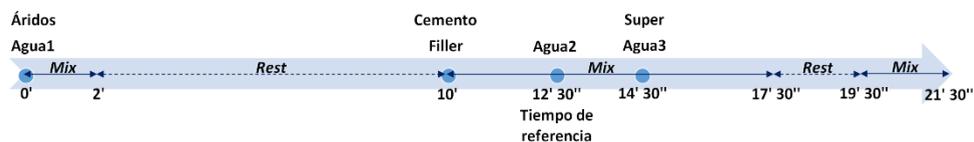


Figura 5. Secuencia de amasado

3.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se analiza la influencia que las distintas variaciones en los materiales producen sobre el comportamiento reológico del hormigón autocompactante reciclado. Para ello se construye una serie de reógrafos que incluyen los resultados a los 15 min de las mezclas fabricadas. Un reógrafo es un gráfico que relaciona la tensión de flujo y la viscosidad plástica, e ilustra con claridad el efecto que diversos cambios (propiedades de los materiales, adiciones, etc.) producen en el comportamiento reológico de un hormigón, mortero o pasta de cemento [12].

En primer lugar, respecto a las variaciones de superplastificante (Fig. 6) se observa que su reducción afecta negativamente y en la misma medida a los parámetros reológicos de todos los HACRs (independientemente del porcentaje de árido reciclado).

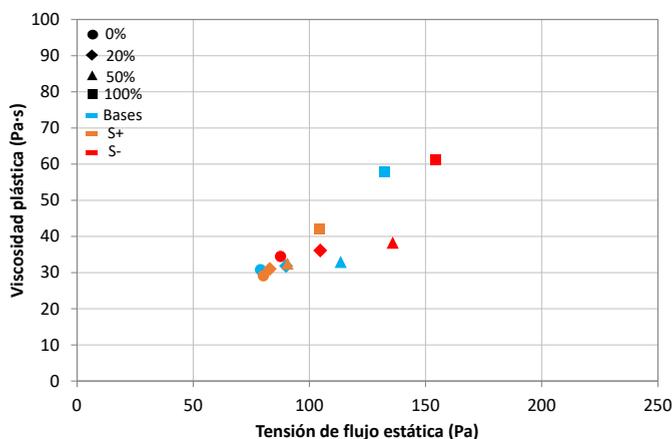


Figura 6. Tensión de flujo estática vs. viscosidad plástica. Variaciones de superplastificante

Contrariamente, incrementar el superplastificante implica mejorar los parámetros reológicos. Cabe destacar en este caso, sin embargo, que al diseñarse el hormigón de referencia con un contenido de superplastificante cercano al punto de saturación, el incremento de superplastificante no afecta en gran medida a las mezclas con un porcentaje de sustitución bajo. Los hormigones con altos porcentajes de árido reciclado (especialmente el 100%), cuya relación a/c efectiva es menor al crecer la absorción no compensada en el amasado, son más sensibles a este incremento ya que su porcentaje de saturación del superplastificante está más alejado del de diseño (Fig. 7).

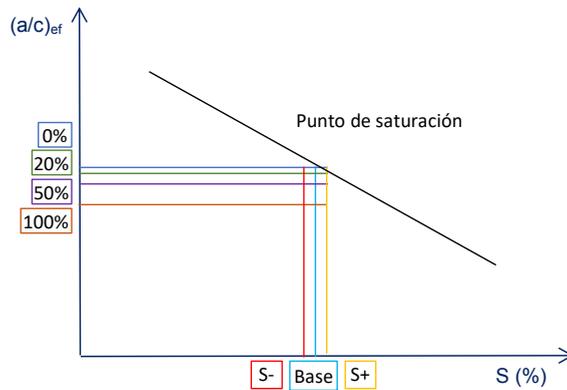


Figura 7. Efecto de las variaciones de superplastificante en el punto de saturación de los HACRs

Cuando se aumenta el cemento (Fig. 8) se observa que disminuye el volumen de pasta, pero crecen tanto la relación a/c efectiva como la relación superplastificante/cemento, empeorando por ello los parámetros reológicos. Al variar el cemento las mezclas con mayores porcentajes de sustitución experimentan mayores cambios en los parámetros reológicos que las mezclas con sustituciones menores. Esto se debe a que los hormigones reciclados presentan una mayor pendiente en las curvas reológicas que los hormigones convencionales [13] (Fig. 9).

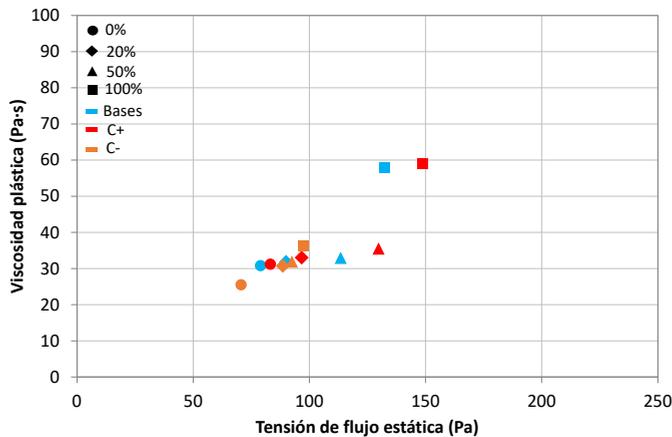


Figura 8. Tensión de flujo estática vs. Viscosidad plástica. Variaciones de cemento

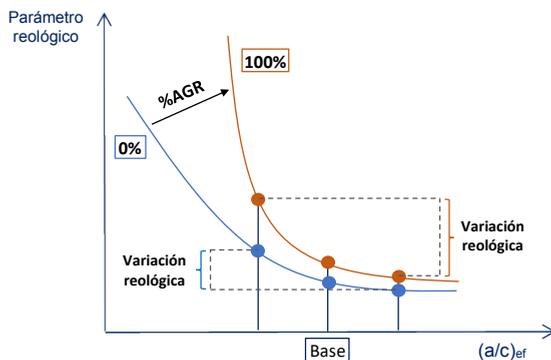


Figura 9. Esquema de curvas reológicas en HAC y HACR

En relación con las variaciones de agua (Fig. 10), su aumento hace crecer la relación a/c efectiva mientras que su disminución la reduce. Este último efecto aumenta los valores de tensión de flujo estática y viscosidad plástica de forma mucho más acusada en los hormigones con el 100% de árido reciclado que en los de 0%, 20% y 50%.

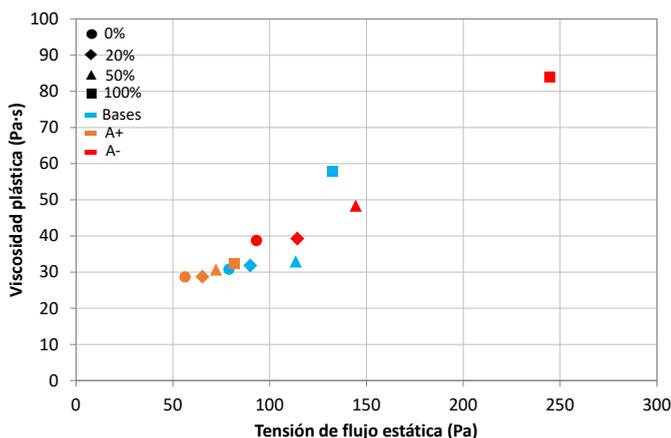


Figura 10. Tensión de flujo estática vs. Viscosidad plástica. Variaciones de agua

De nuevo, los parámetros reológicos cambian más en hormigones reciclados que en hormigones convencionales cuando se varía el agua, ya que aquellos presentan una pendiente más pronunciada en sus curvas reológicas [13] (Fig. 9).

Se comparan finalmente los cambios que producen las diferentes variaciones de materiales (Figs. 11 y 12). Cuando se disminuye el agua, la relación a/c efectiva disminuye y la relación “fracción volumétrica de sólidos/fracción máxima de empaquetamiento” ($\emptyset/\emptyset_{\max}$) aumenta (hay menos volumen de pasta y la fracción volumétrica de sólidos aumenta). Ambos efectos provocan que un incremento del valor de los parámetros reológicos. Sin embargo, cuando se aumenta el cemento disminuyen la relación a/c efectiva y $\emptyset/\emptyset_{\max}$ (hay

más volumen de pasta y la fracción volumétrica de sólidos disminuye). Ambos efectos se contrarrestan haciendo que el valor de los parámetros reológicos disminuya, aunque en menor medida.

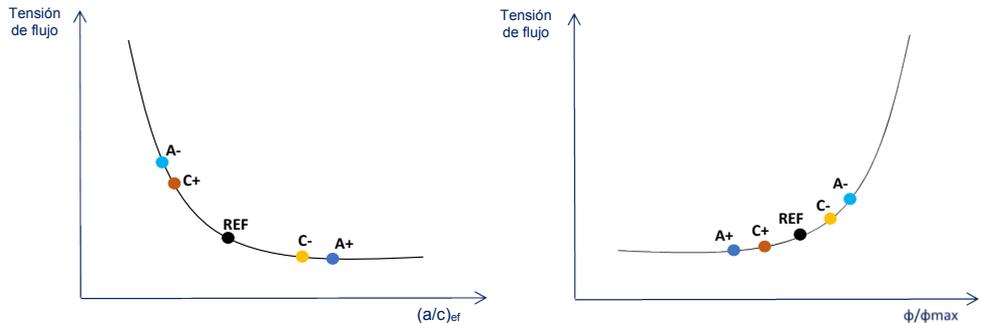


Figura 11. Tensión de flujo vs. $(a/c)_{ef}$. Influencia de las variaciones de materiales **Figura 12.** Tensión de flujo vs. ϕ/ϕ_{max} . Influencia de las variaciones de materiales

Por otro lado, cuando se incrementa el agua la relación a/c efectiva aumenta y ϕ/ϕ_{max} disminuye (hay más volumen de pasta y la fracción volumétrica de sólidos disminuye). Ambos efectos son aditivos y provocan el aumento del valor de los parámetros reológicos. Sin embargo, cuando se reduce la cantidad de cemento aumentan la relación a/c efectiva y ϕ/ϕ_{max} (hay menos volumen de pasta y la fracción volumétrica de sólidos aumenta), contrarrestándose ambos efectos se contrarrestan y provocando, de nuevo, que el valor de los parámetros reológicos aumente de forma menos acusada.

Variar la cantidad de cemento produce una modificación volumétrica menor que la que provoca variar el agua. Este hecho explica que los parámetros reológicos de los hormigones, comparados con los del hormigón de referencia, cambien menos variando el contenido de cemento que haciéndolo con el agua. Por lo tanto, la sensibilidad de un hormigón autocompactante reciclado será menor frente a los cambios en la cantidad de cemento que frente a los del agua.

Las variaciones de superplastificante no implican cambios volumétricos significativos. Sin embargo, el efecto de un superplastificante tiene que ser evaluado teniendo en cuenta su actividad química. En este trabajo se ha observado que la sensibilidad del hormigón autocompactante reciclado a las variaciones del superplastificante resultó similar a la obtenida con las variaciones en el cemento.

4.- CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la influencia que las variaciones en la cantidad de los materiales pueden producir en el comportamiento reológico del hormigón autocompactante reciclado (HACR). Se puede concluir que:

- Reducir la cantidad de superplastificante afecta negativamente y en la misma medida a los parámetros reológicos de todos los HACRs (independientemente del porcentaje de árido reciclado) e incrementarlo los mejora. Sin embargo, un hormigón autocompactante con un alto porcentaje de árido reciclado (100%) es más sensible al incremento ya que su porcentaje de saturación del superplastificante está más alejado del de diseño al ser menor su relación a/c efectiva debido a la evolución de la absorción no compensada durante el amasado del árido reciclado,
- Al variar el cemento y el agua, las mezclas con mayores porcentajes de sustitución experimentan mayores cambios en los parámetros reológicos que las mezclas con sustituciones menores. Esto se debe a que la pendiente de las curvas reológicas es mayor en las mezclas recicladas que en las convencionales.
- El HACR es más sensible a cambios en los parámetros de dosificación que el hormigón autocompactante convencional, especialmente cuando se varía el contenido de agua.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio es parte de los proyectos (a) “Investigación industrial sobre Hormigones para un Mercado Sostenible (InHorMeS)” financiado por la Axencia Galega de Innovación (Ref: IN852A 2013/57); y (b) “Hormigones reciclados autocompactantes robustos: reología en estado fresco y propiedades mecánicas (HORREO)” financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Ref: BIA2014-58063-R). Además, este trabajo fue posible gracias al apoyo de una beca predoctoral de la Xunta de Galicia (España).

REFERENCIAS

- [1] Okamura, H. and Ouchi, M., 'Self-Compacting Concrete', Journal of Advanced Concrete Technology, **1** (1) (2003) 5-15.
- [2] Nunes, S., Milheiro, P., Coutinho, J. S. and Figueiras, J., 'Robust SCC Mixes through Mix Design', Journal of Materials in Civil Engineering, **25** (2013) 183-193.
- [3] Naji, S., Hwang, S-D. and Khayat, K. H., 'Robustness of Self-Consolidating Concrete Incorporating Different Viscosity-Enhancing Admixtures', ACI Materials Journal, **108** (4) (2011) 432-438.
- [4] Collery, D. J., Paine, K. A. and Dhir, R. K., 'Establishing rational use of recycled aggregates in concrete: a performance-related approach', Magazine of Concrete Research, **67** (11) (2015) 559-574.
- [5] Etxeberria, M., Mari, A. R. and Vázquez, E., 'Recycled aggregate concrete as structural material', Materials and Structures, **40** (5) (2007) 529-541.

Influencia de las variaciones en los materiales sobre la reología de hormigones...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [6] González-Taboada, Iris, González-Fonteboa, Belén, Martínez-Abella, Fernando and Carro-López, Diego, 'Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis', *Materiales de Construcción*, **66** (323) (2016).
- [7] Ferreira, L., De Brito, J. and Barra, M., 'Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties', *Magazine of Concrete Research*, **63** (8) (2011) 617-627.
- [8] González-Taboada, Iris, González-Fonteboa, Belén, Eiras-López, Javier and Rojo-López, Gemma, 'Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology', *Journal of Cleaner Production*, **156** (2017) 1-18.
- [9] Grdic, Z. J., Toplicic-Curcic, G. A., Despotovic, I. M. and Ristic, N. S., 'Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate', *Construction and Building Materials*, **24** (7) (2010) 1129-1133.
- [10] Pereira-de-Oliveira, L. A., Nepomuceno, M. C. S., Castro-Gomes, J. P. and Vila, M. F. C., 'Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates', *Construction and Building Materials*, **51** (2014) 113-120.
- [11] Mahaut, F., Mokéddem, S., Chateau, X., Roussel, N. and Ovarlez, G., 'Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials', *Cement and Concrete Research*, **38** (11) (2008) 1276-1285.
- [12] Wallewick, O. H. and Wallewick, J. E., 'Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes', *Cement and Concrete Research*, **41** (2011) 1279-1288.
- [13] González-Taboada, Iris, 'Self-compacting concrete: basic mechanical properties, rheology, robustness and thixotropy', Doctoral Thesis, University of A Coruña, Spain, 2016.