

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Cajas de trabajabilidad como herramienta de diseño de hormigones autocompactantes con árido reciclado

I. González-Taboada ⁽¹⁾, B. González-Fonteboa ⁽¹⁾, F. Martínez-Abella ⁽¹⁾ y F. Varela-Puga ⁽¹⁾

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6360>

RESUMEN

En este trabajo se diseñan siete hormigones autocompactantes convencionales y de cada uno de ellos se obtienen tres hormigones autocompactantes con árido grueso reciclado de hormigón (utilizando sustituciones del 20%, 50% y 100% en volumen). Las mezclas recicladas se fabrican utilizando el árido reciclado seco y con un 3% de humedad natural, añadiendo, en ambos casos, una cantidad de agua extra durante el amasado para compensar la elevada absorción de este tipo de árido. Todos los hormigones se ensayan en estado fresco mediante ensayos empíricos y reológicos a los 15 y 45 minutos del contacto entre cemento y agua. Los resultados indican que las relaciones entre diferentes parámetros de comportamiento en fresco en los hormigones autocompactantes reciclados (HACRs) siguen las mismas tendencias que las observadas en los hormigones autocompactantes convencionales. Para facilitar el diseño de estos HACRs, se proponen unas regiones de trabajabilidad definidas por aquellas mezclas que cumplen una serie de combinaciones de parámetros empíricos. Estas regiones permiten delimitar una caja de trabajabilidad (área en el reograma tensión de flujo estática y viscosidad plástica) en la que se garantiza que los HACRs que se sitúen en ella cumplen diferentes límites empíricos.

PALABRAS CLAVE: hormigón autocompactante, árido grueso reciclado, trabajabilidad, reología.

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La reología se define como la parte de la física que describe el flujo y la deformación de la materia [1, 2]. Desde los años 70 se ha avanzado mucho en el estudio de la reología del hormigón en su estado fresco. Para definir el comportamiento reológico de un fluido se recurre a un diagrama denominado curva de flujo, que representa en sus ejes el esfuerzo aplicado (τ , tensión de corte) y el gradiente de velocidades de deformación ($\dot{\gamma}$).

La bibliografía científica recoge numerosos ensayos simples que intentan cuantificar de forma empírica el comportamiento reológico del hormigón autocompactante (HAC), evaluando su capacidad de flujo, capacidad de paso y su resistencia a la segregación [3, 4].

El correcto comportamiento y la adecuada producción de los hormigones autocompactantes se puede gestionar mediante el control de calidad de las materias primas y la verificación de los parámetros reológicos a través del uso de cajas de trabajabilidad [5]. Con esta denominación se define el espacio bidimensional que establece aquellos pares [tensión de flujo, viscosidad] en los que debe mantenerse una mezcla de hormigón autocompactante para asegurar una fluidez y estabilidad adecuadas. La tensión de flujo se relaciona en general con el diámetro del ensayo de escurrimiento y la viscosidad plástica con los tiempos del ensayo de escurrimiento y del embudo en V. El uso de cajas de trabajabilidad es una forma efectiva de relacionar reología con trabajabilidad [6, 7, 8]. Si los valores de los ensayos se sitúan en el interior de estas cajas durante su tiempo de uso, la mezcla de HAC fresco podrá emplearse.

El objetivo de este trabajo es facilitar el diseño de un material relativamente nuevo, el hormigón autocompactante reciclado (HACR) [9, 10, 11], proponiendo unas regiones de trabajabilidad definidas por aquellas mezclas que cumplan una serie de combinaciones de parámetros empíricos. Estas regiones permitirían delimitar una caja de trabajabilidad (área en el reograma tensión de flujo estática y viscosidad plástica) en la que se garantizaría que los HACRs que se sitúen en ella cumplen diferentes límites empíricos.

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1.- Materiales y hormigones

Los materiales utilizados han sido los siguientes: cemento CEM-I 52.5 R; filler calizo; superplastificante de tercera generación (Sika Viscocrete-70); árido fino natural 0-4 mm, calizo de machaqueo, con módulo granulométrico 4.19, densidad saturada superficie seca 2.72 t/m³, absorción de agua 1%; árido grueso natural 4-11 mm, granítico de machaqueo, con módulo granulométrico 7.14, densidad saturada superficie seca 2.56 t/m³, absorción de agua 1.12%; y árido grueso reciclado, obtenido de residuos de construcción y demolición de hormigón estructural (Fig. 1), con módulo granulométrico 6.47, densidad saturada superficie seca 2.34 t/m³, absorción de agua 6.96%.

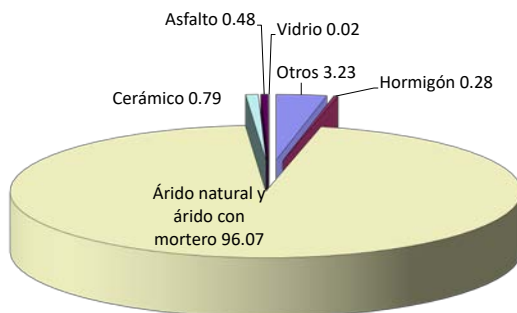


Figura 1. Composición del árido grueso reciclado

En primer lugar se diseñó un hormigón autocompactante de referencia (**Tabla 1**). Se modificó su dosificación variando el contenido de agua ($\pm A$: $\pm 3\%$), superplastificante ($\pm S$: $\pm 5\%$) y cemento ($\pm C$: $\pm 3\%$) de forma independiente. Una vez diseñado el hormigón de referencia (0%) se fabricaron tres tipos de hormigón autocompactante reciclado con un 20%, 50% y 100% de árido grueso reciclado en volumen.

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
Árido fino (kg)	865.59	865.59	865.59	865.59
Árido grueso natural(kg)	768.00	614.40	384.00	0.00
Árido grueso reciclado (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

Asimismo, las mezclas recicladas se fabricaron con el árido seco y con un 3% de humedad. En todos los casos se compensó la absorción del árido reciclado añadiendo una cantidad de agua adicional durante el amasado, de tal forma que se compensara el 80% de su capacidad de absorción a las 24 h.

2.2.- Ensayos realizados

Todos los hormigones se ensayaron mediante ensayos empíricos y reológicos a los 15 y 45 min desde el contacto entre cemento y agua.

Los ensayos empíricos realizados, ampliamente conocidos y utilizados en la evaluación de la trabajabilidad de un hormigón autocompactante, fueron el de escurrimiento, la caja en L, el anillo japonés y el de segregación por tamiz. Todos ellos se describen en las respectivas normas EN.

Los ensayos reológicos consistieron en un ensayo de tensión creciente (*stress growth test*) y un ensayo de curva de flujo (*flow curve test*). Ambos se realizaron con un reómetro rotacional. El primero se realizó a una velocidad baja y constante partiendo del hormigón en reposo. A continuación se efectuó el ensayo de curva de flujo, con un período de ruptura de la mezcla de 20 s a 0.5 rps seguido de 7 escalones decreciendo la velocidad desde 0.5 a 0.05 rps. Finalmente, se rehomogeneizó el hormigón y se dejó en reposo hasta el siguiente tiempo de ensayo.

3.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este trabajo se define una caja de trabajabilidad que garantiza un comportamiento reológico adecuado de los hormigones autocompactantes reciclados, diseñados en esta investigación con una relación a/c efectiva entre 0.44 y 0.47, con árido grueso reciclado de hormigón y compensando el agua de absorción. Su aplicación evitaría la realización de múltiples ensayos empíricos, caracterizándose así los HACRs con los dos parámetros reológicos fundamentales, tensión de flujo y viscosidad plástica, y desarrollándose únicamente ensayos reológicos.

El criterio para construir la caja de trabajabilidad consistió en el cumplimiento de diferentes parámetros empíricos, teniendo en cuenta su relación con las principales propiedades en estado fresco del hormigón autocompactante: resistencia a la segregación, capacidad de flujo y capacidad de paso. De acuerdo con la bibliografía [12, 13, 14], los ensayos empíricos recomendados relacionados con estas propiedades son los siguientes:

- Ensayo de segregación por tamiz: parámetro SR (porcentaje), principalmente para evaluar la resistencia a la segregación.
- Ensayo de escurrimiento: parámetros SF (diámetro) y t500 (tiempo), principalmente para evaluar la capacidad de flujo.
- Ensayo de la caja en L: parámetro PL, principalmente para evaluar capacidad de paso.
- Ensayo del anillo japonés: parámetro SFJ (diámetro), para evaluar capacidad de flujo y capacidad de paso.

La **Tabla 2** muestra los parámetros empíricos medidos para cada hormigón y los límites establecidos como objetivo.

Tabla 2. Parámetros empíricos y límites objetivo

<i>Ensayo</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Límites objetivo</i>	<i>Referencia</i>
Escurrecimiento	t500 (s)	[0.8-3.8]	[12]
	SF (mm)	[660-850]	[13]
Caja en L	PL	≥ 0.80	[13]
Anillo japonés	t500J (s)	[2-5]	-
	SFJ (mm)	[610-850]	[12, 14]
Segregación por tamiz	SR (%)	≤ 20	[13]

A continuación se presentan las relaciones entre parejas de parámetros empíricos (a edades de 15 y 45 min) que se relacionan con la misma propiedad del hormigón autocompactante como fluido [12, 15, 16]. Así, respecto a la tensión de flujo, se analizan las relaciones entre SF y PL y entre SF y SFJ (Fig. 2). En cuanto a la viscosidad plástica, se estudia la relación entre los tiempos t500 y t500J (Fig. 3).

Se puede observar que el HACR muestra la misma tendencia que el HAC convencional en las relaciones analizadas (Figs. 2 y 3). La Figura 2 muestra que el parámetro PL aumenta cuando lo hace el parámetro SF. Un valor de $PL \geq 0.8$ (el mínimo requerido para un comportamiento autocompactante [13]), se alcanza fácilmente si la fluidez del hormigón es alta ($SF \geq 660$ mm). Por lo tanto, todas las mezclas con valores de diámetro de escurrimiento altos mostraron una capacidad de paso adecuada medida con la caja en L.

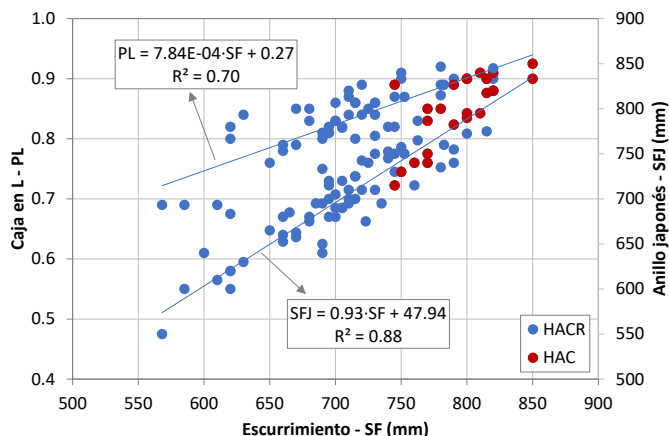


Figura 2. Relaciones entre SF y PL, SF y SFJ

Se obtuvo una buena correlación lineal entre SF y SFJ (Fig. 2). El mínimo valor establecido en la **Tabla 2** para SFJ, 610 mm, se correspondería con un valor de SF muy similar. Esto significa que las mezclas con un diámetro de escurrimiento alto son capaces de mostrar buena fluidez en el anillo japonés.

Por último, la Figura 3 muestra una correlación lineal bastante buena entre los tiempos del ensayo de escurrimiento y del anillo japonés. El rango [2-5] s establecido para el parámetro t_{500J} en la **Tabla 2** se puede verificar ahora teniendo en cuenta el rango del parámetro t_{500} de [0.8-3.8] s [12].

En segundo lugar, se obtienen dos regiones de trabajabilidad relacionando un parámetro evaluador de capacidad de paso con un parámetro evaluador de la capacidad de flujo, es decir, PL con t_{500} (Fig. 2) y SF con t_{500J} (Fig. 3). En estas regiones, el parámetro SFJ también se consideró y las mezclas que no cumplieran el ensayo de segregación por tamiz se descartaron previamente.

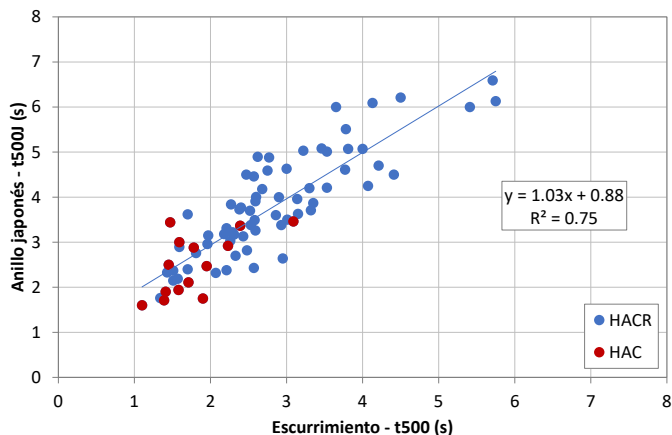


Figura 3. Relación entre t500 y t500J

La Figura 4 identifica la región de trabajabilidad (RT1) donde el HACR puede desarrollar una capacidad de flujo y de paso correspondientes a un tiempo t500 entre 0.8 y 3.8 s y un parámetro PL mayor de 0.8. Además, esta región de trabajabilidad se define también con el resultado del diámetro en el ensayo del anillo japonés (SFJ entre 610 y 850 mm).

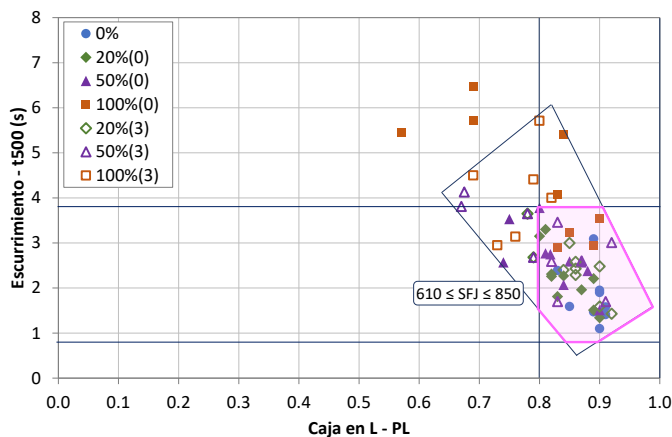


Figura 4. Región de trabajabilidad 1 (RT1)

Nota: “(0)”: árido seco; “(3)”: árido con 3% de humedad

En la Figura 5, la región de trabajabilidad (RT2) se corresponde con mezclas con un diámetro de escurrimiento (SF) entre 660 y 850 mm y un tiempo t500J en el ensayo del anillo japonés entre 2 y 5 s. De nuevo esta región de trabajabilidad se define considerando los límites mencionados anteriormente.

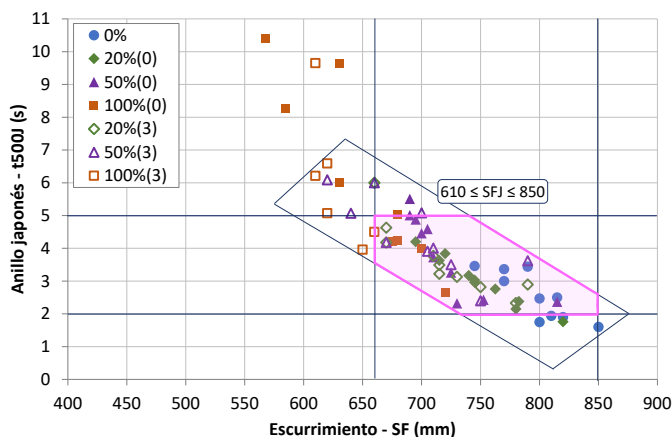


Figura 5. Región de trabajabilidad 2 (RT2)

Nota: “(0)”: árido seco; “(3)”: árido con 3% de humedad

Finalmente, cada mezcla se clasifica observando el número de regiones de trabajabilidad que cumplió (dos, una o ninguna). Así, las mezclas que cumplieron las dos regiones de trabajabilidad se agrupan en un área definida por un polígono que se puede considerar como una caja de trabajabilidad (Caja15, resultados a los 15 min) (Fig. 6). Esta caja de trabajabilidad muestra combinaciones recomendadas de tensión de flujo estática y viscosidad plástica para los HACRs a 15 min. Además, una segunda caja (Caja45) define la evolución temporal de estos valores reológicos hasta los 45 min. En ambas áreas, los HACRs diseñados satisfacen los siguientes límites empíricos:

- $660 \text{ mm} \leq \text{SF} \leq 850 \text{ mm}$
- $0.8 \leq t500 \leq 3.8 \text{ s}$
- $0.8 \leq \text{PL} \leq 1$
- $610 \text{ mm} \leq \text{SFJ} \leq 850 \text{ mm}$
- $\text{SR} \leq 20\%$

En la Figura 6, los puntos en color naranja se utilizan para validar la caja de trabajabilidad propuesta. Estos resultados corresponden a mezclas fabricadas con las variaciones en el contenido de cemento. Como se puede observar, los puntos naranja que están dentro de la “Caja15” evolucionan hasta los puntos naranja dentro de la “Caja45”. Además, se ha verificado que estos puntos corresponden a HACRs sin segregación y satisficieron los límites definidos por las dos regiones de trabajabilidad (RT1 y RT2): $660 \text{ mm} \leq \text{SF} \leq 850 \text{ mm}$, $0.8 \leq t500 \leq 3.8 \text{ s}$, $0.8 \leq \text{PL} \leq 1$ y $610 \text{ mm} \leq \text{SFJ} \leq 850 \text{ mm}$.

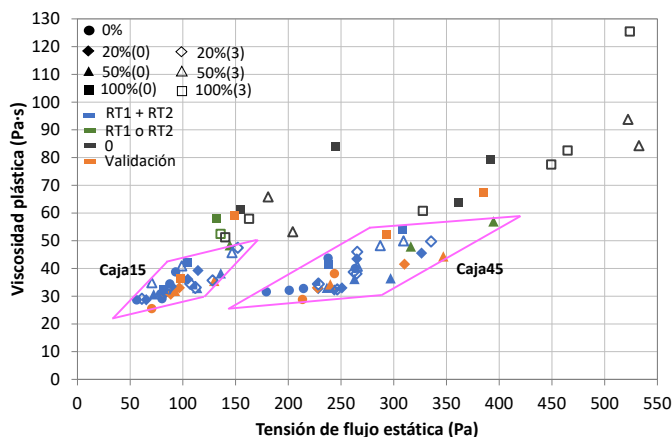


Figura 6. Caja de trabajabilidad (a 15 min y su evolución a 45 min)

Nota: “(0)”: árido seco; “(3)”: árido con 3% de humedad; “RT”: región de trabajabilidad

4.- CONCLUSIONES

En este trabajo se han utilizado como herramienta de diseño del hormigón autocompactante reciclado (HACR) las cajas de trabajabilidad. Las principales conclusiones se resumen a continuación:

- Los resultados indican que las relaciones entre diferentes parámetros de comportamiento en fresco en los HACRs siguen las mismas tendencias que las observadas en los hormigones autocompactantes convencionales.
- La caja de trabajabilidad propuesta proporciona unidades físicas fundamentales de los parámetros reológicos del HACR, describiendo el comportamiento como fluido de este material. Al mismo tiempo, esta caja incluye HACRs que cumplirían una serie de límites empíricos. Por lo tanto, el uso de cajas de trabajabilidad resulta una forma efectiva para diseñar un HACR con un comportamiento en fresco adecuado, sin necesidad de realizar múltiples ensayos empíricos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio es parte de dos proyectos titulados: (a) “Investigación industrial sobre Hormigones para un Mercado Sostenible (InHorMeS)” financiado por la Axencia Galega de Innovación (Ref: IN852A 2013/57); (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] Barnes, H.A., 'A Handbook of Elementary Rheology. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics', University of Wales, 2000. ISBN: 0-9538032-0-1.
- [2] Banfill, P.F.G., 'The rheology of fresh cement and concrete - A review', in: Proceedings, '11th International Congress on the Chemistry of Cement', Durban, South Africa, 2003, **1** 50-62.
- [3] Khayat, K. H. and Assaad, J., 'Relationship between washout resistance and rheological properties of high-performance underwater concrete', *ACI Materials Journal*, **100** (3) (2003) 185-193.
- [4] Roussel, N., 'Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results', *Materials and Structures*, **39** (2006) 501-509.
- [5] Wallevick, O. H. and Wallevick, J. E., 'Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes', *Cement and Concrete Research*, **41** (2011) 1279-1288.
- [6] Ferraris, C. F., Brower, L., Ozyildirim, C. and Daczko, J., 'Workability of Self-Compacting Concrete', National Institute of Standards and Technology, reprinted from *The Economical Solution for Durable Bridges and Transportation Structures*, 'International Symposium on High Performance Concrete', Proceedings, PCI/FHWA/FIB. 25-27 September 2000, Orlando, Florida, 398-407.
- [7] Hwang, S-D., Khayat, K. H. and Bonneau, O., 'Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications', *ACI Materials Journal*, **103** (2) (2006) 121-129.
- [8] Koehler, E. P., 'Use of Rheology to Specify, Design, and Manage Self-Consolidating Concrete', Proceedings of the Tenth ACI International Symposium on 'Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues', Sevilla, Spain, 2009.
- [9] Corinaldesi, V. and Moriconi, G., 'The role of industrial by-products in self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, **25** (2011) 3181-3186.
- [10] Kou, S. C. and Poon, C. S., 'Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates', *Cement and Concrete Composites*, **31** (9) (2009) 622-627.
- [11] González-Taboada, I., González-Fonteboá, B., Pérez-Ordóñez, J. L. and Eiras-López, J., 'Prediction of self-compacting recycled concrete mechanical properties using vibrated recycled concrete experience', *Construction and Building Materials*, **131** (2017) 641-654.

Cajas de trabajabilidad como herramienta de diseño de hormigones autocompactantes...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [12] Measurement of properties of fresh self-compacting concrete. Final Report. European Research Project: 'TESTING-SCC', 2001-2004.
- [13] EN 206-9: Concrete. Part 9: Additional rules for self-compacting concrete (SCC).
- [14] Chan, K. D., Ong, K. C. G. and Tam, C. T., 'Passing ability of SCC – Improved method based on the P-Ring', 35th Conference on Our World in Concrete & Structures, 25 - 27 August 2010, Singapore.
- [15] Koehler, E. P. and Fowler, D. W., 'Summary of Concrete Workability Test Methods. (Research Report ICAR 105-1)', International Center for Aggregates Research, Austin, TX, 2003.
- [16] Nguyen, T. L. H., Roussel, N. and Coussot, P., 'Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid', Cement and Concrete Research, **36** (2006) 1789-1796.