

REOLOGIA DE HORMIGONES AUTOCOMPACTABLES

Zerbino, R.^{1*} Barragán, B.², Agulló, L.², García, T.² y Gettu, R.³

RESUMEN

El diseño y aplicación del Hormigón Autocompactable (HAC) constituye uno de los temas de mayor impacto e interés en el mundo en el campo de la tecnología del hormigón. En términos reológicos un HAC se caracteriza por poseer una tensión umbral de cizallamiento muy baja y una viscosidad plástica capaz de garantizar el transporte, llenado y consolidación del hormigón sin segregación. La caracterización reológica en estado fresco brinda información para diseñar diferentes clases de HAC y permite valorar la influencia de los materiales componentes así como el efecto de diversas variables externas. Este trabajo analiza la reología del HAC, en primer lugar se presentan los conceptos reológicos y las variables que modifican la respuesta del hormigón fresco, destacando las características particulares del HAC; en segundo término se muestran resultados correspondientes a un programa de investigación en el que se empleó un BML Viscometer 3 (CONTEC) con el fin de ponderar la influencia de factores que afectan la producción del HAC como la temperatura del hormigón, el tiempo transcurrido luego de finalizar mezclado y las condiciones de exposición luego de la elaboración; finalmente se analiza la vinculación entre los parámetros reológicos y las medidas de los ensayos de tipo ingenieril más frecuentemente utilizados (escurrimiento y embudo en V).

INTRODUCCION

En las últimas décadas se han producido avances muy importantes en el campo de la tecnología del hormigón. Uno de los hitos en este progreso ha sido la aparición de los superfluidificantes en los años '70; gracias a estos aditivos químicos se han desarrollado varios tipos de hormigones denominados especiales. Demás está decir que las innovaciones no se han limitado a la formulación de nuevos aditivos químicos sino que también han surgido cambios significativos a través de nuevas técnicas de transporte, colocación y compactación o la incorporación de fibras y diversas adiciones. Sin embargo uno de los hormigones especiales que en la actualidad suscita mayor interés para la industria de la construcción es el Hormigón Autocompactable (HAC). Este material fue desarrollado por iniciativa del profesor Okamura en Japón, quien lo definió como un hormigón capaz de fluir en el interior de los encofrados, pasar a través de las armaduras de refuerzo y llenar los elementos estructurales, compactándose solamente por la acción de su propio peso (1). En pocos años el HAC se ha desarrollado y aplicado en el resto del mundo.

¹ Investigador CONICET-LEMIT- Prof. Facultad de Ingeniería UNLP. zerbino@ing.unlp.edu.ar

* Con el apoyo del Programa Alβan, Programa de becas de alto nivel de la Unión Europea para América Latina, beca nº E04E047473AR.

² Dto de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

³ Dept. of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India.

Como se infiere de su misma denominación las propiedades en estado fresco constituyen una de las características salientes del HAC, el análisis de las mismas se relaciona con el objetivo de este artículo. Excede el propósito de este trabajo profundizar en lo referente a los materiales componentes, criterios de diseño de mezclas, propiedades mecánicas y durables, o ejemplos de aplicación. El lector encontrará abundante bibliografía al respecto en publicaciones periódicas, artículos de divulgación y numerosas conferencias internacionales de máximo nivel realizadas en poco más de una década. Asimismo en distintos países ya se han redactado especificaciones de uso y normas de ensayo específicas para el HAC (2-7).

Como es habitual para caracterizar al hormigón fresco se emplean ensayos de tipo ingenieril que se destacan por su sencillez, economía y facilidad de realización en obra. Sin embargo estos métodos, aún algunos más sofisticados, pocas veces permiten calificar en forma absoluta el comportamiento del hormigón fresco; por ejemplo se reconoce que dos hormigones con un mismo valor de asentamiento pueden tener distinta trabajabilidad, o que dos hormigones que se comportan en forma similar en condiciones de reposo pueden diferir substancialmente cuando se los somete a movimiento.

La reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de los materiales vinculando las relaciones entre esfuerzo aplicado, deformaciones y tiempo. Desde hace años se han construido diferentes viscosímetros para estudiar al hormigón fresco, que posibilitaron un mayor conocimiento del material y de los factores que lo modifican. Los estudios de reología han permitido interpretar el comportamiento del hormigón bombeado, el hormigón de alta performance y, más recientemente, la caracterización y diseño del HAC.

En este trabajo se estudia el comportamiento reológico del HAC. Tiene por objetivo divulgar algunos de los últimos avances sobre el tema realizados en el marco del programa de cooperación entre el LEMIT y el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC – Barcelona - España) para el desarrollo y caracterización de hormigones autocompactables. Incluye una síntesis de los conceptos de reología aplicados al hormigón y de las variables que modifican la respuesta de este material en estado fresco. Se muestran algunos de los resultados obtenidos en un extenso programa experimental realizado con el propósito de analizar variables que afectan la producción del HAC, como el mezclado, la temperatura y las condiciones de exposición (8). Finalmente se analiza la vinculación entre las medidas de los ensayos ingenieriles y los parámetros reológicos. A partir de estos resultados se dan ejemplos de los parámetros reológicos propios de los diferentes tipos de HAC.

REOLOGIA DEL HORMIGON FRESCO

La reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia. 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 ($\dot{\gamma}$).

Los líquidos y suspensiones diluidas pueden ser clasificados en 4 grandes categorías según sus propiedades a saber: a) Newtonianos, b) no-Newtonianos con comportamiento independiente del tiempo, c) no-Newtonianos con comportamiento dependiente del tiempo y d) viscoelásticos. En la Fig. 1 se muestran diferentes tipos de respuestas que pueden ofrecer los materiales, entre los que se incluye el hormigón (9,10).

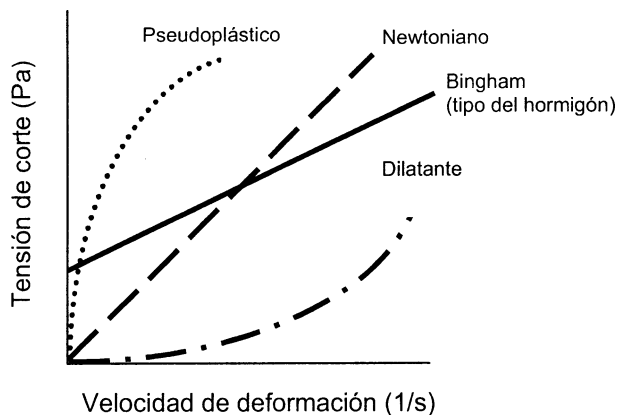


Figura 1. Curvas de flujo características de diferentes tipos de comportamiento reológico.

Muchos materiales poseen un valor umbral por debajo del cual no se produce el movimiento. A estos materiales también se los conoce como viscoplásticos. Los fluidos que responden al modelo de Bingham se comportan como newtonianos por sobre el umbral. Este modelo es uno de los que mejor representa el comportamiento de la pasta de cemento, el mortero y el hormigón; emplea dos parámetros para caracterizar el movimiento: el umbral de cizallamiento (τ_0) que representa la resistencia a la deformación en condiciones estáticas y la viscosidad plástica (μ), que se puede asociar a una resistencia creciente al movimiento (ecuación 1).

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad [1]$$

Los materiales que por encima de la tensión umbral se comportan como *dilatantes* o *pseudoplásticos* son mejor representados por otros modelos como el de Herschel-Bulkley (ecuación 2) donde a y b son constantes (11). Este modelo también ha sido utilizado para representar el comportamiento del HAC (12)

$$\tau = \tau_0 + a\gamma^b \quad [2]$$

Existen fluidos donde la viscosidad puede ir cambiando aunque el esfuerzo aplicado sea constante; entre ellos se distinguen los de comportamiento tixotrópico. Un fluido tixotrópico posee una estructura que se rompe durante el movimiento y se reconstituye al volver al reposo. El hormigón conforme la naturaleza del cemento, adiciones minerales y aditivos químicos puede o no ofrecer una respuesta tixotrópica. En la práctica, un comportamiento tixotrópico se refleja en una pérdida de la fluidez cuando el material se deja en reposo y una recuperación de la capacidad de fluir si luego se aplica una determinada energía (7,13). Este aspecto puede cobrar especial interés práctico si se considera que esa pérdida de fluidez o recuperación de la estructura redundará en una significativa disminución de la presión sobre los encofrados (14).

Viscosímetros y reómetros para el estudio del hormigón

Desde hace muchos años se emplean viscosímetros coaxiales para estudiar la reología de las pastas de cemento; sin embargo, inicialmente, no fueron suficientemente adecuados para evaluar el comportamiento del hormigón fresco. Debido a la presencia de los agregados fue necesario utilizar un reómetro, que consiste en una paleta que se mueve dentro del hormigón a diferentes velocidades registrando el esfuerzo entregado. Los primeros reómetros se basaron en la determinación del consumo de energía y, aunque limitados por la falta de precisión en las medidas, sirvieron para establecer que el hormigón posee un comportamiento tipo Bingham. Una segunda generación de reómetros mejoró la precisión en la medida del momento torsor utilizando sistemas de transmisión hidráulica. El aparato original de Tattersall operaba manualmente midiendo el esfuerzo torsor (T) a cinco velocidades diferentes. El comportamiento reológico típico medido con este aparato responde a la ecuación:

$$T = g + h N \quad [3]$$

donde g es la resistencia al flujo (N.m) y h la viscosidad del torque (N.m.s). Actualmente existe una nueva generación de reómetros y viscosímetros para la determinación de los parámetros reológicos del hormigón. La incorporación de sistemas computarizados y equipamiento electrónico para las medidas de esfuerzos y velocidades ha mejorado substancialmente la precisión en las determinaciones. Entre ellos merecen mencionarse mejoras a las versiones originales de Tattersall, el UBC rheometer, el BT RHEOM y el viscosímetro BML de cilindros coaxiales. Se ha comprobado la buena correlación entre las medidas de los diversos viscosímetros (15).

Factores que modifican el comportamiento reológico

Los estudios reológicos han contribuido al mayor conocimiento de las propiedades en estado fresco de los materiales a base de cemento portland. Aunque la pasta es esencialmente agua y partículas de cemento, su comportamiento es bastante diferente a una suspensión de sólidos inertes; existen fuerzas de atracción entre las partículas que dan lugar a la formación de flóculos, poco tiempo después del contacto con el agua se producen rápidas reacciones que dan lugar a la disolución de iones y luego comienzan a formarse productos hidratados sobre las superficies de las partículas. Estas membranas que se forman en torno a los flóculos se rompen durante el mezclado lo que justifica que el esfuerzo necesario para mover el sistema vaya cambiando en función de la velocidad de deformación (9).

Este fenómeno depende fuertemente de la energía de mezclado en especial en las pastas de cemento. En el hormigón la presencia de los agregados favorece el mecanismo de rotura de los flóculos disminuyendo el efecto del método de mezclado. Se ha indicado que ésta es una de las principales dificultades para comparar la respuesta reológica entre pastas y hormigones (16).

La mayoría de los cambios que se producen en la composición del hormigón afectan su respuesta reológica (9). En general no es posible analizar por separado muchos de los factores ya que existen interacciones entre ellos. El contenido de agua afecta en forma notoria la viscosidad plástica y la resistencia al flujo, a mayor contenido de agua ambos parámetros se reducen en forma significativa. La mayoría de los aditivos modifican

los parámetros reológicos. Los reductores de agua, en especial los superfluidificantes, reducen ligeramente la viscosidad plástica pero disminuyen considerablemente la resistencia al flujo, este comportamiento se puede justificar en base a la dispersión de los flóculos y el aprovechamiento del agua atrapada entre los mismos. Los efectos son más notorios en mezclas con bajas relaciones agua /cemento. El aire incorporado reduce ambos parámetros, en general a medida que aumenta el contenido de aire los efectos sobre la viscosidad son menores. En el diagrama umbral de cizallamiento vs. viscosidad plástica de la Fig. 2 se esquematiza el efecto de los cambios en el contenido de agua, de superfluidificante y de aire incorporado (17).

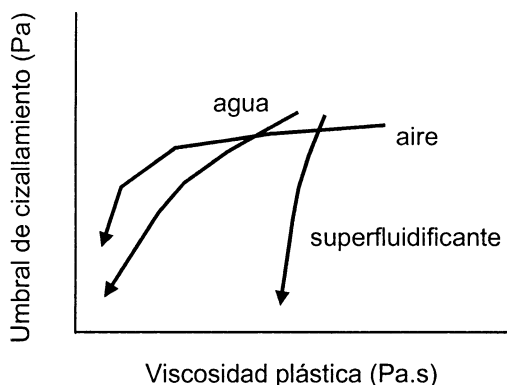


Figura 2. Efectos sobre los parámetros reológicos del incremento en el contenido de agua, superfluidificante y aire intencionalmente incorporado.

El *tipo de cemento* afecta la respuesta reológica en función de los componentes que reaccionan a mayor velocidad; entre los de mayor incidencia aparecen el contenido de sulfatos y el de C_3A . También se ha comprobado un efecto importante de las *adiciones minerales* y de los *aditivos químicos*. No es muy sencillo acotar el efecto del *tipo de agregado*, ya que cuando éste se modifica también cambian parámetros como el contenido de agua o el volumen de pasta; sin embargo se ha encontrado que agregados con formas redondeadas reducen significativamente la viscosidad plástica y, en parte, la tensión umbral.

Para el mismo conjunto de materiales componentes existen otros factores que modifican la respuesta reológica, entre ellos se destacan el paso del *tiempo* y los cambios de *temperatura*. El fenómeno de pérdida de asentamiento en el tiempo es ampliamente conocido. En términos reológicos lo que ocurre es que se modifican la tensión umbral (τ_0) y la viscosidad plástica (μ); se ha notado que los cambios son más notorios en la primera.

La reología ha posibilitado una mejor evaluación de casos de aplicación como el transporte por bombeo o la compactación por vibrado. A partir de los parámetros reológicos se han estimado las presiones de bombeo considerando longitudes y diámetros de las tuberías; también se observó que la tensión umbral disminuye notablemente cuando el hormigón es vibrado (9).

PROPIEDADES REOLOGICAS DEL HAC

Los estudios reológicos han permitido comprender el comportamiento del HAC y de ese modo han contribuido a un diseño más racional de este nuevo hormigón. En la Fig. 3 se comparan en forma esquemática curvas de flujo de un HAC, un hormigón convencional (HC) y un hormigón fluido de alta resistencia (HAR). Un HAR posee habitualmente mayor viscosidad plástica que un HC, en gran parte debido a su menor relación agua/ligante, y también presenta menor umbral de cizallamiento. Por su parte un HAC posee tensión umbral casi nula y una viscosidad suficiente para garantizar el transporte, llenado y consolidación del hormigón sin que segregue.

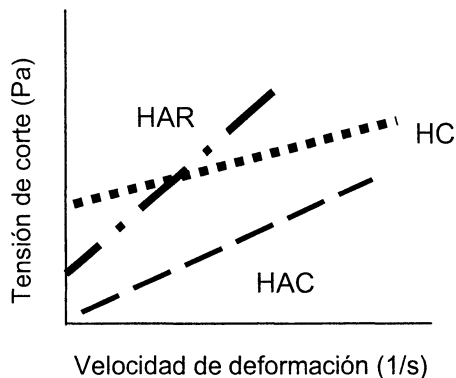


Figura 3. Curvas de flujo características de un HAC, un hormigón convencional (HC) y un hormigón fluido de alta resistencia (HAR).

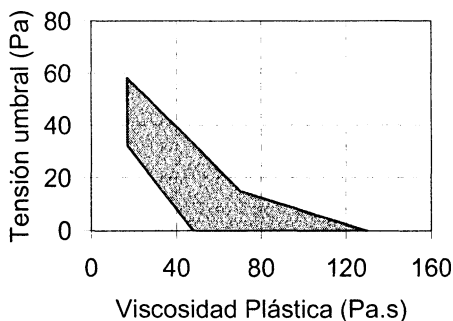


Figura 4. Zona de HAC en el plano umbral de cizallamiento - viscosidad plástica (18).

En HAC la fluidez, la capacidad de pasaje y la resistencia a la segregación son fundamentales, pero en general las dos primeras se oponen a la última. Para lograr un HAC se requiere una adecuada combinación entre la tensión umbral y la viscosidad plástica para lograr movilidad sin riesgos de segregación; en mezclas con alta viscosidad se requiere que la tensión umbral sea prácticamente nula, mientras que en un HAC menos viscoso es conveniente que aumente. Esto coincide con lo sugerido por Nielsson and Wallevik (18) quienes han propuesto (Fig. 4) una zona de autocompactabilidad para parámetros

determinados con un aparato CONTEC Viscometer 3. Se destaca que mientras la tensión umbral es mucho menor que la de un hormigón convencional vibrado (menor a 60 Pa comparada con valores típicos de 100 a 1000 Pa), la viscosidad plástica posee un orden similar (30 a 100 Pa.s). Una combinación con ambos parámetros (τ_0 y μ) extremadamente bajos podría implicar riesgos de segregación.

Parámetros reológicos y ensayos ingenieriles

Ante el surgimiento del HAC fue necesario desarrollar nuevos métodos de ensayo de tipo ingenieril para su caracterización en estado fresco; entre ellos se destacan el ensayo de escurrimiento (slump flow) y el embudo en V (V-funnel). El primero utiliza un Cono de Abrams que se llena sin compactar, se obtienen como resultados el diámetro final (D_f) y el tiempo (T_{50}) en el cual el HAC alcanzó un diámetro de 500 mm; por su parte el segundo mide el tiempo de pasaje (T_V) a través de un recipiente con forma de V y una boquilla de salida de 65 x 75 mm de sección. Los detalles de los dispositivos y forma de realización de los ensayos han sido ampliamente descritos en la bibliografía (6, 7). Los estudios reológicos han permitido una mayor comprensión del significado de estas determinaciones.

Se ha encontrado que para un mismo conjunto de materiales algunos ensayos de tipo ingenieril se correlacionan con los parámetros reológicos, pero esto no ocurre cuando existen cambios de componentes, proporciones, humedad en los áridos, etc. Algunos autores (19) indican que si bien existe una relación entre la tensión umbral y el diámetro de escurrimiento resulta menos sensible en mezclas muy fluidas, a la vez informan que la viscosidad plástica se relaciona con T_{50} y T_V , pero no con el diámetro de escurrimiento. Sin embargo las correlaciones cambian entre distintos tipos de HAC. Además las correlaciones están afectadas por la variabilidad en la determinación de los tiempos de flujo. Aunque los ensayos ingenieriles sirven para el control en obra, no siempre alcanzan a comparar hormigones preparados con diversos materiales.

Clases de HAC

Así como ocurre con la definición de trabajabilidad del hormigón, el concepto de HAC debe asociarse y referirse al tipo de estructura a la que se destine el material, en este sentido también varía la zona de autocompactabilidad. En efecto, la capacidad de pasaje dependerá del espaciado de barras del elemento que está siendo llenado, el grado de resistencia a la segregación dependerá de los métodos de colocación y transporte y del tamaño, en particular la altura del elemento a llenar (13). En este sentido se han definido varias clases de HAC según sus aplicaciones (20).

Recientemente en las European Guidelines for Self Compacting Concrete (7) se han propuesto diferentes clases de HAC en base al ensayo de escurrimiento, las mismas se sintetizan en la Tabla 1 indicando el rango de valores y algunos ejemplos de aplicación. La capacidad de pasaje, la viscosidad y la resistencia a la segregación se toman en cuenta sólo si se considera específicamente necesario. La viscosidad puede valorarse a través del T_{50} en el ensayo de escurrimiento o del tiempo de vaciado del embudo en V (T_V); al respecto también se indican en la misma recomendación diferentes clases de HAC en base a los resultados de estos dos últimos datos.

Tabla 1. Clases de HAC en European Guidelines for Self Compacting Concrete (7).

Clase	Escurrimiento	Aplicaciones
SF1	550-650 mm	Losas de viviendas, túneles, pilotes y fundaciones.
SF2	660-750 mm	Muros, columnas.
SF3	760-850 mm	Estructuras densamente armadas.

Clase	T_{50}	T_V	Aplicaciones
VS1/VF1	< 2 s	< 8 s	Estructuras muy armadas, con requisitos de terminación o riesgos de exudación o segregación.
VS2/VF2	> 2 s	9 – 25 s	Cuando se requiera mejorar la resistencia a la segregación.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

Como fuera expresado anteriormente dentro del programa de investigaciones conjuntas se desarrolló un extenso estudio experimental sobre la reología del HAC. Entre los objetivos se propuso analizar la influencia de diversos factores que inciden en el control de producción del HAC dadas sus implicancias directas sobre la calidad final del material. Entre otros aspectos se observó el efecto de la temperatura del hormigón y de la energía de mezclado.

Los parámetros reológicos fueron obtenidos mediante un BML Viscometer 3, que cuenta con un recipiente de 20 litros y proporciona como resultados pares de valores momento torsor - velocidad de giro (T vs. N) medidos a velocidades decrecientes; a partir de los mismos calcula la tensión umbral y la viscosidad plástica aplicando el modelo de Bingham. Los dos tipos de HAC seleccionados para realizar el estudio fueron elaborados con arenas y gravas de trituración, cemento tipo CEM I 42.5 R, filler calizo y un aditivo superfluidificante de tipo policarboxílico, variando el tamaño de agregado grueso. A modo de ejemplo se presentan a continuación algunos de los resultados obtenidos.

En la Fig. 5.a se muestran curvas momento torsor (N.m) vs. velocidad (revoluciones por segundo) obtenidas con el viscosímetro BML sobre tres mezclas con agregados de 12 mm de tamaño máximo, elaboradas con idénticas proporciones y tipo de materiales variando la temperatura del agua, que fue incorporada a 2, 22 y 37 °C. Aunque los hormigones alcanzaron temperaturas apenas diferentes (21, 24 y 27 °C respectivamente) las curvas se modifican y la mayor fluidez corresponde al HAC con temperatura intermedia.

Por otro lado, en la Fig. 5.b se presentan curvas correspondientes a otras tres mezclas con agregados de 20 mm de tamaño máximo, en este caso también se elaboraron con las mismas proporciones de materiales y todos los componentes (a excepción del aditivo) se mantuvieron herméticamente embolsados durante 24 horas a 5, 20 o 40 °C. En esta ocasión los HAC alcanzaron temperaturas de 17, 27 y 35 °C respectivamente; nuevamente se aprecia mayor fluidez con la temperatura intermedia y mayor viscosidad con los materiales más fríos.

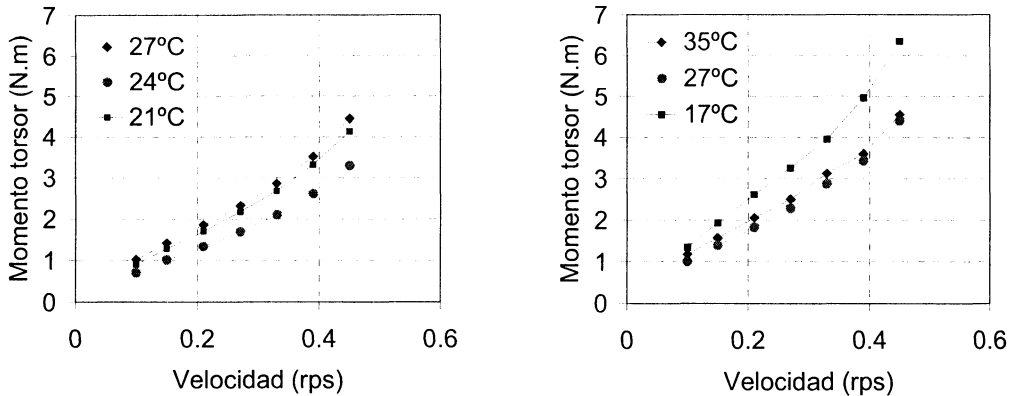


Figura 5. Curvas momento torsor – velocidad para HAC con distintas temperaturas.
 5.a (izquierda): elaborados con agua a distinta temperatura.
 5.b (derecha): elaborados con todos los materiales a distinta temperatura.

Estos ejemplos muestran que pueden aparecer comportamientos singulares en función de la temperatura, hecho que resulta de importancia en la práctica. Los estudios realizados evidenciaron que esto también se puede reflejar en los resultados de algunos ensayos como el escurrimiento o el embudo en V. Tales observaciones concuerdan con estudios sobre morteros donde se observó mayor viscosidad para bajas temperaturas (21), y estudios sobre HAC donde si bien no se encontraron grandes variaciones de trabajabilidad entre 5 y 25 °C, se observó una mayor demanda de superfluidificante y pérdidas de fluidez a 30 °C (22). Otros autores, midieron mayor fluidez a 20 °C que a 10 °C (23). Se ha indicado que la temperatura parece afectar al HAC elaborado con superfluidificantes de tipo policarboxilato y que la mayor temperatura puede aumentar la fluidez y la tendencia a segregar, mientras que las bajas temperaturas pueden favorecer una rigidización que afecte la autocompactabilidad (24).

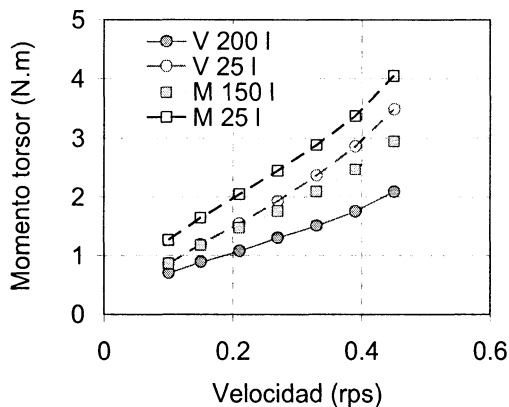


Figura 6. Curvas momento torsor – velocidad de hormigones de iguales proporciones elaborados con diferentes mezcladoras.

Tabla 2. Parámetros reológicos y resultados de ensayos ingenieriles de hormigones elaborados en pastones con diferentes volúmenes.

HAC	Viscosímetro		Escurrimiento		Embudo en V	Temperatura
	τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	D_f (mm)	T_{50} (s)	T_V (s)	(°C)
V, 200 litros	19	24	635	1.0	3.7	25
V, 25 litros	5	55	640	1.7	5.8	26
M, 150 litros	17	45	660	2.0	6.4	19
M, 25 litros	21	60	615	3.0	6.8	17

En la Fig. 6 se comparan las curvas momento torsor vs. velocidad correspondientes a hormigones con idénticas proporciones elaborados con diferentes mezcladoras y distintos volúmenes; la experiencia se realizó en verano (V) y luego se repitió meses más tarde a temperaturas moderadas (M). Se aprecia cómo el material de los pastones pequeños muestra mayor viscosidad plástica que cuando el HAC se elabora en mayor volumen. Esto confirma el significativo efecto del tipo y energía de mezclado sobre las propiedades del HAC. En la Tabla 2 se incluyen como referencia los resultados de los parámetros reológicos de dichos pastones junto con los obtenidos en los ensayos ingenieriles.

Cabe comentar que también se analizó la variación de los parámetros reológicos a lo largo del tiempo, durante las dos horas posteriores a la elaboración, en hormigones expuestos a diferentes condiciones ambientales. Entre las observaciones salientes se encontró que las variaciones en el tiempo fueron más importantes a temperaturas elevadas y mayores en la tensión umbral que en la viscosidad plástica.

Ensayos ingenieriles vs parámetros reológicos

En forma simultánea a las medidas realizadas con el viscosímetro se evaluó la autocompactabilidad mediante los ensayos de escurrimiento y embudo en V. En este apartado se presentan algunos de los resultados que muestran la vinculación entre los parámetros reológicos y las medidas de estos ensayos ingenieriles.

En la Fig. 7 se presenta la variación de los resultados del ensayo de escurrimiento (D_f , T_{50}) y los tiempos del embudo en V en función de cada uno de los parámetros reológicos. Los datos obtenidos se diferencian según el tamaño máximo del agregado de cada HAC (12 o 20 mm); a la vez se han discriminado las medidas a temperaturas moderadas (M) y las correspondientes a experiencias realizadas con los mismos materiales en verano (V). Se incluyen resultados obtenidos inmediatamente después de elaborado el HAC junto con las determinaciones realizadas durante casi dos horas luego del inicio del mezclado. Nótese que durante este lapso algunos hormigones perdieron su condición de HAC. Un rápido análisis de las figuras muestra una buena correlación entre el diámetro de escurrimiento y la tensión umbral, al igual que entre la viscosidad plástica y los tiempos de flujo (T_{50} o T_V). También surge que para lograr un diámetro de escurrimiento mayor a 500 mm (ver T_{50}), la tensión umbral debe ser menor a 60 Pa, mientras que la viscosidad plástica puede variar significativamente.

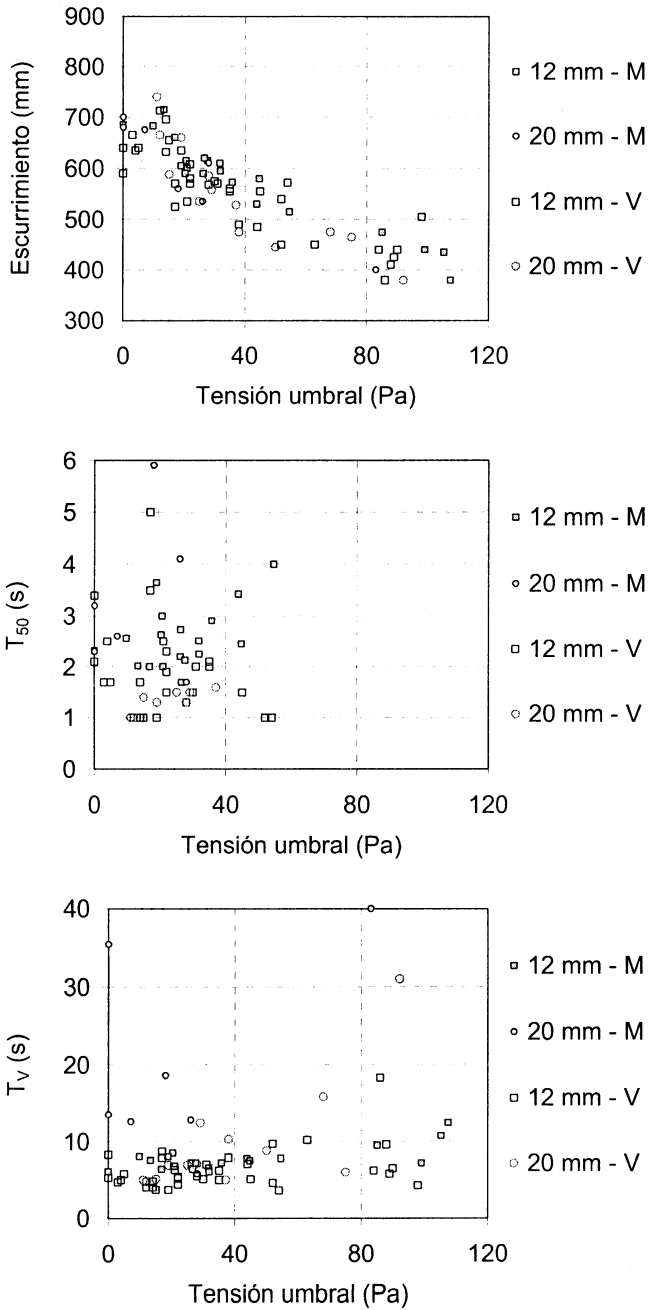


Figura 7.a. Relaciones entre los resultados de los ensayos ingenieriles y la tensión umbral.

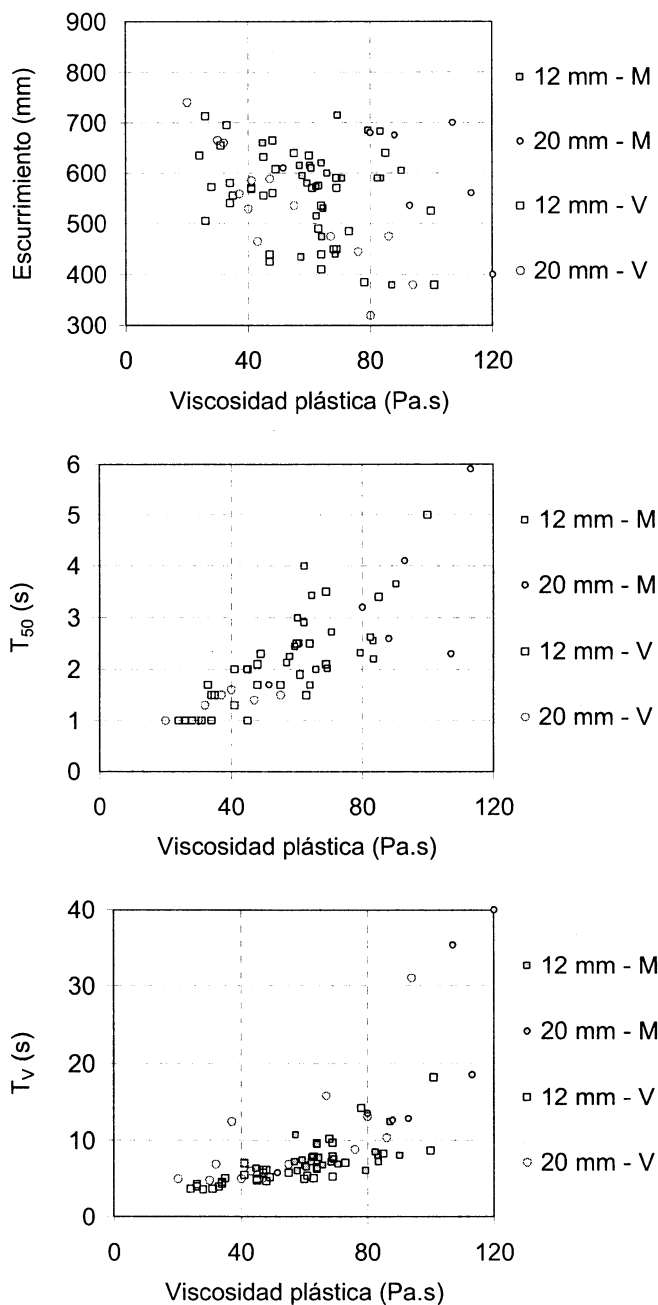


Figura 7.b. Relaciones entre los resultados de ensayos ingenieriles y la viscosidad plástica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han desarrollado los principales aspectos sobre reología del hormigón fresco y su aplicación en el estudio del hormigón autocompactable (HAC). Se realizó un planteo general del comportamiento en estado fresco del material y de los factores que modifican su respuesta reológica, así como de las características particulares que posee el HAC.

Se presentaron resultados de un extenso programa experimental desarrollado en el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC (Barcelona). Los mismos muestran que el HAC posee una tensión umbral prácticamente nula en comparación a la del hormigón convencional, mientras que la viscosidad plástica puede tener un orden similar. Es importante una adecuada combinación de ambos parámetros para lograr la movilidad deseada evitando la segregación; en mezclas con alta viscosidad es conveniente una tensión umbral extremadamente baja, mientras que en HAC con menor viscosidad es deseable que aumente la tensión umbral. El estudio experimental comprobó que para un mismo hormigón los parámetros reológicos se modifican con la temperatura del hormigón o con la energía de mezclado, por lo que estos factores pueden constituir una causa importante de variación en las propiedades del HAC. Finalmente se observó que para un mismo conjunto de materiales algunos ensayos de tipo ingenieril siguen tendencias semejantes a las de los parámetros reológicos; existen buenas correlaciones entre el diámetro de escurrimiento y la tensión umbral y entre la viscosidad plástica y los tiempos de flujo (T_{50} o T_V). Desde este punto de vista las medidas reológicas permiten una mayor comprensión del significado de los ensayos ingenieriles.

AGRADECIMIENTOS

Al personal del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC por su ayuda para la realización del programa experimental. Los trabajos de investigación en UPC contaron con el apoyo del Programa Alþan, Programa de becas de alto nivel de la Unión Europea para América Latina, beca n° E04E047473AR, y del proyecto PSS 11-2005, PSE-380000-2007-1: HABITAT 2030, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España.

REFERENCIAS

- (1) Okamura, H., Ozawa, K. and Ouchi, M., "Self-Compacting Concrete". Structural Concrete, Journal of the FIB Vol. 1, N° 1, March 2000, pp. 3-17.
- (2) RILEM Pub. PRO 007, 1st Int. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ed by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, 1999, Stockholm, Sweden. 804 p.
- (3) RILEM Report rep023, State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC. Self-Compacting Concrete. Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, 2000. 168 p.
- (4) RILEM Pub. PRO 33. 3rd Int. RILEM Symp. Reykjavik, Iceland, 2003, Ed. O. Wallevik and I. Nielsson, 1056 p.
- (5) Sec. North Am. Conf. on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, 2005, Ed. S. P. Shah, H. Wood Pub., Addison, IL, USA. Vol. 1 and 2, 1270 p.
- (6) EFNARC 2002, Specifications and Guidelines for Self-compacting Concrete, <http://www.efnarc.org/pdi/SandGforSCC.pdf>
- (7) EPG 2005, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification Production and Use. <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>

- (8) Zerbino, R., Agulló, L. Barragán, B., García, T. y Gettu, R. "Caracterización reológica de hormigones autocompactables", Ed: Dto. Ing. de la Construcción Univ. Politécnica de Catalunya, Barcelona, ISBN: 84-87691-40-4-2, 2006, 83 p.
- (9) Beaupré, D. and Mindess, S. "Rheology of Fresh Concrete: Principles, Measurement, and Applications", in Materials Science of Concrete V, Ed. J. Skalny and S. Mindess, American Ceramic Society, USA, 1998, pp 149-190.
- (10) Schramm, G. "A practical approach to rheology and rheometry", HAAKE, Karlsruhe, Alemania, 1994, 290 p.
- (11) de Larrard, F., Ferraris, C. F., Sedran, T., "Fresh Concrete: A Herschel-Bukley Material" Materials and Structures, Vol. 31, N° 211, 1998, pp. 494-498.
- (12) Mouret, M. and Cyr, M. Discussion of "The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete" by M. R. Geiker et al, Cement and Concrete Research Vol. 33, 2003, pp. 1901-1903.
- (13) Concrete Society, "Self-compacting Concrete – A review". Technical Report N 62, Camberley, UK. 2005. <http://www.concrete.org.uk>
- (14) Assaad, J., Khayat, K.H., and Mesbah, H., "Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete", ACI Mat. J., Vol. 100, N° 2, March 2003, pp. 99-107.
- (15) Brower L.E. and Ferraris C.F. "Comparison of concrete rheometers". Concrete International, Aug. 2003, pp. 41-47.
- (16) Ferraris, C.F. and Martys, N.S. "Relating fresh concrete viscosity measurements from different rheometers", Vol. 108, N° 3, Jour. of Research of the National Institute of Standards and Technology 229, 2003, pp. 229-234.
- (17) Con Tec. 2001, The BML Viscometer Operating Manual, Reykjavik, Iceland, 123 p.
- (18) Nielsson, I. and Wallevik, O.H. "Rheological evaluation of some empirical test methods–Preliminary results". 3rd Int. RILEM Symp. Reykjavik, Iceland, Ed. O. Wallevik and I. Nielsson, (RILEM Pub. PRO 33), 2003, pp. 59-68.
- (19) Koyata, H. and Comman, C. "Workability measurement and developing robust SCC mixture design". Sec. North Am. Conf. on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, Ed. S. P. Shah, H. Wood Pub., Addison, IL, USA, 2005. pp 799-805.
- (20) Walraven, J. "Self compacting concrete: challenge for designer and researcher", Sec. North Am. Conf. on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, Ed. S. P. Shah, H. Wood Pub., Addison, IL, USA., 2005, pp. 431-446.
- (21) Caszewski, J.G. and Szwabowski, J. "Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars", Cement and Concrete Research Vol. 34, 2004, pp. 235–248.
- (22) Kaszynska, M. "Early age properties of SCC". Sec. North Am. Conf. on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, Ed. S.P. Shah, H. Wood Pub., Addison, USA. 2005, pp. 905-910.
- (23) Brameshuber, W. and Uebachs, S. "The influence of the temperature on the rheological properties of self-compacting concrete". 3rd Int. RILEM Symp. Iceland, Ed. O. Wallevik and I. Nielsson, (RILEM Pub. PRO 33), 2003, pp. 174-183.
- (24) Pellerin, B., Maitrasse, P. and Micollier, S. "Improving consistency of SCC rheological behavior by means of appropriate admixturization" Sec. North Am. Conf. on the design and use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, Ed. S.P. Shah, H. Wood Pub., Addison, IL, USA. 2005, pp.17-23.