

Verificación de las propiedades reológicas del hormigón sin vibrado

E. GALLO¹, D. REVUELTA²

¹ Instituto de Tecnología Profesor Jorge A. Sábato. (1650) San Martín, Buenos Aires (Argentina).

² Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (C.S.I.C.). 28033 – Madrid.

El proceso de puesta en obra constituye un aspecto clave en las propiedades finales del hormigón. La mejora de este proceso ha desembocado en la aparición de nuevos tipos de hormigón en los que no se necesita vibrado mediante medios mecánicos para rellenar los encofrados. Este tipo de hormigón, conocido como autocompactable, se distingue de otros hormigones por sus propiedades reológicas; pero los actuales ensayos de verificación de las propiedades del hormigón resultan insuficientes para la caracterización completa del hormigón sin vibrado en estado fresco. Este trabajo estudia algunos de los métodos de valoración de propiedades en estado fresco, llegando a distinguir ventajas e inconvenientes de dichos métodos.

Palabras clave: hormigón autocompactable, reología, escurrimiento, caja en L

Verification of the rheological properties of self-compacting concrete

The process of casting is a key issue in the final properties of concrete. The struggle to improve this process has brought the development of a new type of concrete that does not require external vibration in order to fill the formwork. This new type of concrete, known as self-compacting concrete, differs from other concretes in its rheological properties, but the existing concrete tests does not provide enough information to fully characterize this concrete, either during the design process or the reception at the work place. This work studies some of the proposed validation tests for the fresh state, distinguishing some advantages and drawbacks among them.

Keywords: self-compacting concrete, rheology, slump-flow, L-box

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón autocompactable es un hormigón que no necesita medios de compactación externos para su correcta ejecución durante la puesta en obra. Siguiendo esta filosofía, se busca un hormigón que en su estado fresco posea un bajo grado de fricción entre sus partículas, adecuado para darle una fluidez elevada, pero que a la vez esté dotado de la viscosidad necesaria para asegurar la cohesión y evitar la segregación. Por tanto, es la reología del hormigón en el estado fresco la que determina su cualidad de autocompactable. La fluidez elevada y la viscosidad adecuada se alcanzan utilizando aditivos superfluidificantes [1-3], adiciones de elevada finura [4-7] y en algunos casos agentes que aumentan la viscosidad [8]. Este tipo de modificaciones a las propiedades también implica cambios en la tecnología utilizada en los procesos del hormigón en el estado fresco [9], ya que los hormigones autocompactables poseen una gran sensibilidad al contenido de agua por lo que resulta de gran importancia que el equipo de dosificación posea la precisión adecuada y se controle regularmente el contenido de humedad de los áridos. Precisamente debido a esta elevada sensibilidad, es necesario establecer métodos muy estrictos de control del hormigón en su estado fresco. En lo que respecta a las propiedades del hormigón endurecido, los hormigones autocompactables poseen en general una alta resistencia mecánica debido a las bajas relaciones a/c que poseen, aunque la evaluación de dichas propiedades no entran dentro del objeto de este trabajo.

2. REOLOGÍA DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTABLE

El comportamiento reológico de un hormigón está fuertemente marcado por la reología de la pasta, es decir, la mezcla de agua, ce-

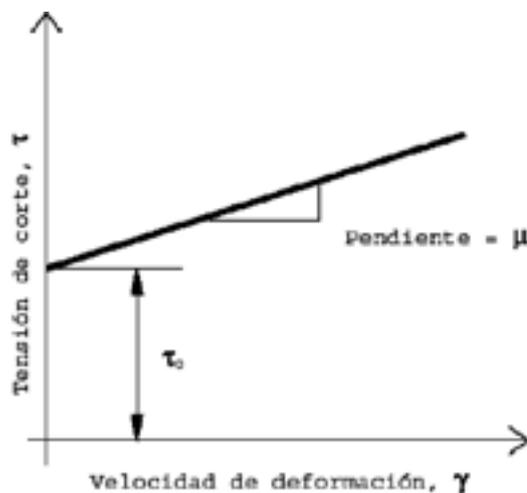


Figura 1. Representación gráfica del modelo de Bingham

mento portland y las adiciones de material de granulometría más fina. Para describir ese comportamiento se han utilizado hasta el momento una diversidad de modelos que relacionan la velocidad de deformación con la tensión de cizalladura aplicada [10]. Los más comúnmente empleados son el modelo de Bingham y el de Herschel-Bulkley para algunos casos particulares [11].

Bingham: $\tau = \tau_0 + \mu\gamma$

Herschel-Bulkley: $\tau = \tau_0 + \mu\gamma$

Aunque simple, el modelo reológico de Bingham da una buena idea del comportamiento básico del material (Fig. 1). Al intentar poner en movimiento el hormigón es necesario vencer una resistencia, τ_v debido al rozamiento entre las partículas. Una vez iniciado el movimiento, se requiere seguir aumentando la fuerza aplicada al fluido para conseguir “acelerarlo”, debido a la cohesión entre las partículas. Esta resistencia posterior se mide a través de la viscosidad, μ . El hormigón autocompactable frente a un hormigón convencional presenta una tensión de inicio de flujo inferior, similar a la que presentan los hormigones fluidos; pero a diferencia de éstos, en los que la viscosidad es menor que la de un hormigón convencional, la viscosidad del hormigón autocompactable es mayor incluso que la de los hormigones convencionales, asegurando la cohesión. Sin embargo, es necesario destacar que aunque una baja tensión de inicio de flujo es un objetivo común en cualquier aplicación con hormigón autocompactable, la viscosidad puede variar de forma considerable dependiendo de la técnica de producción y de la aplicación.

3. PARTE EXPERIMENTAL

La medida directa de los parámetros reológicos es complicada, y se hace mediante equipamiento costoso (reómetros) y poco práctico. Con objeto de solucionar este problema, se han desarrollado nuevos métodos de medida indirecta de los dos principales parámetros que caracterizan a un fluido Bingham, la tensión de inicio de flujo, τ_v y la viscosidad, μ , con los que se trata de caracterizar las propiedades del hormigón en estado fresco [12-13].

Uno de los ensayos más comunes que se realiza a los hormigones autocompactables es el de escurrimiento, usando el mismo cono de Abrams que se emplea para medir el asentamiento de los hormigones convencionales. En este caso los valores representativos del ensayo son el diámetro final del hormigón una vez que ha alcanzado el equilibrio, que es una medida indirecta de la tensión de inicio de flujo, (Fig. 2), y el tiempo que tarda en alcanzar un diámetro de 50 cm (T50), que mide indirectamente la viscosidad (Fig. 3). Se supone que un hormigón autocompactable adquiere las propiedades reológicas adecuadas cuando se extiende más allá de un diámetro mínimo, y T50 está también por encima de un valor específico para asegurar que la viscosidad sea lo suficientemente alta. En algunos casos resulta también evidente la tendencia a la segregación por separación de los componentes durante este ensayo.

Otro dispositivo que propone la bibliografía para apreciar la viscosidad de un hormigón es el embudo en V (Fig. 4). El valor obtenido, que corresponde al tiempo de vaciado, no sirve por sí solo como criterio para determinar si un hormigón puede ser considerado autocompactable o no. Generalmente es complementario con otro tipo de ensayos, aunque las dimensiones del aparato varían según los autores consultados.

Por último, otro tipo de ensayo ampliamente difundido en la evaluación de hormigones autocompactables son las cajas que reproducen el flujo de hormigón en el llenado de los encofrados, generalmente con rejillas construidas con barras de acero para simular la presencia de armaduras. No existe uniformidad en cuanto a la geometría y a las dimensiones con que han sido construidas. Las geometrías más difundidas son las de la caja en forma de L y de U. La caja en L o L-box es un dispositivo con un compartimento vertical, que posee una compuerta en la parte inferior de uno de sus laterales que se llena con el hormigón de prueba (Fig. 5). Al abrir la compuerta el hormigón fluye a través de una rejilla de barras de acero de construcción hacia otro compartimento, que en el modelo más común tiene 60 cm de longitud. Durante esta operación se mide el tiempo que tarda el hormigón en llegar a una mar-



Figura 2. Medida del escurrimiento total en el ensayo con el cono de Abrams



Figura 3. Medida del T50 en el ensayo de escurrimiento



Figura 4. Ensayo con embudo en V



Figura 5. Caja en L

ca a 20 cm de la rejilla y hasta otra que se encuentra a 40 cm (T20 y T40 respectivamente). Cuando el hormigón se detiene se mide la diferencia de altura en la cota de la superficie libre del hormigón entre los puntos extremos del compartimento horizontal. T20 y T40 dan una idea de la viscosidad del hormigón, mientras que la diferencia de altura entre los extremos es representativa de la capacidad del hormigón para autonivelarse por efecto del propio peso. Otra característica muy importante que puede ser apreciada en este ensayo es el riesgo de bloqueo, que se manifiesta cuando las partículas de árido se traban entre sí al pasar entre las barras de la rejilla. Otro dispositivo similar es la caja en U o U-box (Fig. 6), que es una caja con dos compartimentos verticales de sección rectangular comunicados en su parte inferior a través de una compuerta con una rejilla de acero.

Para evaluar el hormigón se llena uno de los compartimentos y se abre la compuerta. El parámetro representativo es la diferencia de alturas entre las dos columnas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se eligieron una serie de mezclas siguiendo el proceso de diseño establecido por el CBI sueco [13], con objeto de intentar caracterizar un hormigón autocompactable usando estos ensayos como criterio de aceptación y/o rechazo. Las mezclas y los resultados aparecen en la Tabla 1.



Figura 6. Caja en U

Las columnas sombreadas indican los resultados óptimos obtenidos en conjunto. En general, se observa que la medida del diámetro obtenido en el ensayo de escurrimiento da una buena idea de las características de fluidez del hormigón, y se determina de manera clara e inequívoca. La literatura habla de valores por encima de 650 mm para considerar un hormigón como autocompactable, aunque quizás el valor del límite inferior debería limitarse en función del tipo de aplicación. La verificación de la viscosidad es más complicada. El hormigón fluye tan rápido que los tiempos (T50, T20, T40) están casi fuera de la resolución de la medida (el operador accionando el cronómetro)

TABLA 1. MEZCLAS Y RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ENSAYOS DE VERIFICACIÓN

		H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11
Composición	Grava [kg/m ³]	803	842	793	696	699	728	796	670	814	678	646
	Arena [kg/m ³]	903	842	878	880	792	863	896	871	917	882	840
	Cemento [kg/m ³]	369	372	354	365	338	319	351	338	362	315	316
	Agua [kg/m ³]	185	193	190	148	179	176	182	183	183	188	189
	Superfluidificante [l/m ³]	16,5	16,6	15,8	9	9,4	8,9	9,8	21,3	10,1	8,8	9,1
	Filler calizo [kg/m ³]	-	-	-	-	272	195	-	-	-	-	-
	Filler dolomítico [kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	-	185	-	199	271
	Ceniza volante [kg/m ³]	-	-	-	244	-	-	50	-	-	-	-
Microsilíce [kg/m ³]	-	-	37	-	-	-	-	-	-	-	-	
Características	Volumen de pasta [%]	38%	39%	39%	39%	38%	35%	39%	40%	37%	40%	43%
	a/c	0,50	0,52	0,54	0,41	0,53	0,55	0,52	0,54	0,51	0,60	0,60
Ensayos	Escurrecimiento [mm]	530	580	530	760	510	590	650	550	600	600	650
	T50 [s]	19,6	5,3	5	4,2	4	3,6	4	10	10	4	6
	Embudo V [s]	57	14,7	5,2	11,3	6,9	8,9	48	17	60	19,7	15,3
	Caja en U [mm]	125	90	70	0	70	70	100	40	140	30	10
	Caja en L [mm]	-	-	-	25	-	-	-	0	120	-	35
	T20 [s]	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	2
	T40 [s]	-	-	-	-	bloqueo	bloqueo	bloqueo	-	15	bloqueo	5,3
Resistencia mecánica	7 días [MPa]	46,8	43,7	43,7	52,6	37,6	36,4	49,4	42,9	54,9	40,9	40,5
	28 días [MPa]	52,6	49,4	59,7	63	44,1	41,5	52,3	46,8	59	44,7	43,5

Los tiempos T20 y T40 son difíciles de determinar por la rapidez con que fluye el hormigón, con lo que no aportan información clara. En cuanto al embudo en V y el T50, las medidas tampoco acaban de ser concluyentes, aunque sí se puede obtener cierta información. (Fig.7).

Por ejemplo, en el embudo en V parece claro que la franja de validez para aceptar un hormigón autocompactable está entre 10 y 20 segundos. Pero la dispersión es muy amplia, y es difícil interpretar los resultados. En cuanto al T50, los resultados están muy agrupados en torno al valor de 5 segundos, con lo que tampoco es concluyente. Lo que sí parece notarse es que para valores por debajo de 4 segundos, el riesgo de bloqueo es considerable.

5. CONCLUSIONES

La fluidez es fácil de determinar mediante el ensayo de escurrimiento, ya que la medida es clara y directamente relacionada con la característica reológica de tensión de inicio de flujo. Sin embargo, los métodos indirectos para la medida de la viscosidad son complicados de interpretar en ausencia de otros ensayos. Se desprende que la verificación de las propiedades reológicas del hormigón autocompactable exige realizar un conjunto de ensayos, y no uno aislado.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Tattershall, G "The rheology of fresh concrete".
2. Flatt, R.; Houst, Y. "A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers" *Cement and Concrete Research*, 31 (2001), p.1169
3. Cyr, M.; Legrand, C.; Mouret, M. "Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behavior of cement pastes containing or not mineral additives" *Cement and Concrete Research*, 30 (2000)
4. Ferraris, C.; Obla, K.; Hill, R. "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete" *Cement and Concrete Research* 31 (2001) p. 245

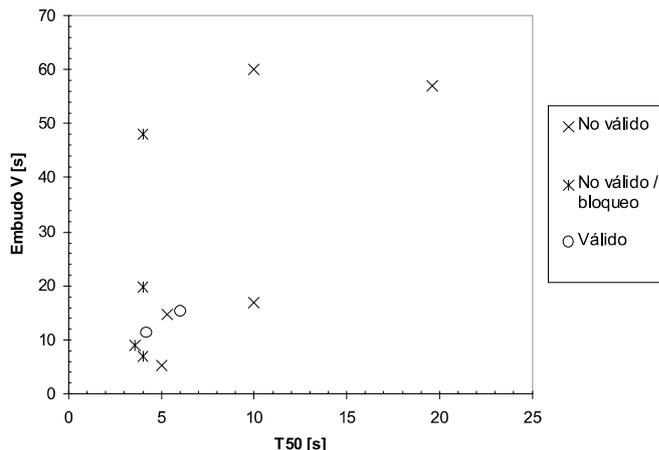


Figura 7. Comparación de los métodos indirectos de medida de la viscosidad, T50 y embudo en V

5. Takara, Pelova, Walraven, "Influence of microfillers on proportioning of mortar in self compacting concrete"
6. Nischer, P. "The effect of different additions on flowability of SCC"
7. Jianxiong; Xincheng, Yubin, "A study of self compacting HPC with superfine sand and pozzolanic additives"
8. Rols, S.; Ambroise, J.; Péra, J.; "Effects of different viscosity agents on the properties of self leveling concrete" *Cement and Concrete Research* 29 (1999) p.261
9. Emborg, M. "Production of self compacting concrete, mixing, transport and placing" *Proceedings Seminar on Self Compacting Concrete ECCREDI* (2000)
10. Banfill, P. "The rheology cement paste: progress since 1973"
11. Ferraris, C.; de Larrard, F. "Testing and modeling of fresh concrete rheology" NISTIR 6094 (NIST, United States Department of Commerce)
12. Bartos, P., "Key properties of fresh self-compacting concrete: a case for standardization" *Proceedings from Seminar on Self-Compacting Concrete, ECCREDI* (2000)
13. Billberg, P., "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience", CIB Report 2:99

Recibido: 1.2.03
 Aceptado: 30.11.03

