

# Mediciones reológicas de hormigón fresco y hielo frazil con el reómetro móvil eBT-V\*

Dra. Helena Keller. *Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH.*  
M. Sc. Felix Paul. *Universidad de Duisburg-Essen.*

*Hoy en día, la medición reológica es cada vez más importante para los materiales de base cemento y otras suspensiones como el hielo frazil. Para describir el mecanismo de amortiguamiento del océano y, por lo tanto, la evolución del hielo del mar como un importante impulsor del desarrollo del clima, una precisa descripción del comportamiento reológico del hielo frazil se hace imprescindible. En el presente artículo se hace una introducción breve del reómetro móvil modelo eBT-V y su aplicación para investigaciones del hormigón fresco y mediciones del hielo frazil.*

## 1. Introducción

La reología es la ciencia de la deformación y fluencia de los materiales donde existe la relación entre la presión, el esfuerzo, velocidad de deformación, y el tiempo. Los parámetros reológicos más importantes son el límite de fluencia, la viscosidad y la tixotropía. El límite de fluencia describe el comportamiento de un fluido que se comporta como un cuerpo sólido elástico hasta cierta carga (límite de fluencia y límite de elasticidad) y por encima como un líquido con viscosidad plástica. La viscosidad describe la resistencia de un fluido y la tixotropía (y también la reopexia) como un proceso reversible dependiente del tiempo del cambio del límite de elasticidad y la viscosidad como función de la carga.

Utilizando las mediciones reológicas es posible la caracterización de los fluidos newtonianos y no newtonianos. Los fluidos newtonianos pueden ser caracterizados por un simple coeficiente de viscosidad para una temperatura determinada. Si bien la viscosidad de los fluidos newtonianos cambiará con la temperatura, no lo hará con la velocidad de cizalla. Los fluidos cuya viscosidad cambia con la velocidad de cizalla se llaman fluidos no newtonianos. No solo los fluidos sino también las suspensiones se caracterizan de un modo similar.

### 1.1 Reología de los materiales de base cemento

Los materiales en base de cemento pueden encuadrarse dentro de los fluidos no newtonianos. El control de las propiedades reológicas es importante en la tecnología moderna de los hormigones. La principal medición para la trabajabilidad, el ensayo de asentamiento, no es siempre factible. Dos hormigones con el mismo asentamiento pueden fluir diferentemente y tener diferente trabajabilidad. Un aditivo adecuado puede interferir con las interacciones de las interpartículas y ello influenciar fuertemente sobre la reología de los materiales frescos en base de cemento [1-4]. Como resultado, cualquier pequeña fluctuación en el contenido de agua puede llevar a mayores cambios en el comportamiento del hormigón fresco, que queda reflejado en una fluidez cambiada, diferente comportamiento de aireación y especialmente en el decrecimiento de la estabilidad de la mezcla y la segregación. Las propiedades del hormigón fresco están relacionadas con las propiedades del hormigón endurecido y, por lo ello, debe ser examinado y medido.

### 1.2 Reología de hielo graso en la zona helada marginal de la Antártida

Uno de los cambios estacionales más largos que tienen lugar en nuestro planeta

es el crecimiento y el decaimiento del hielo de mar en la región polar de la Antártida [5]. Estas variaciones estacionales tienen gran importancia sobre la flora y fauna de la Antártida y para el clima global.

El hielo llamado frazil consiste en cristales de hielo sueltos en forma de discos que se forman en aguas turbulentas y heladas [6] y representan un papel importante en el proceso de congelación en la zona helada marginal de la Antártida. La zona helada marginal es el espacio de transición entre el hielo consolidado y el mar abierto, donde la concentración del hielo del mar oscila entre el 15 y el 80% [7]. Cuando hay una cantidad suficientemente grande de hielo frazil, tiene tendencia a agruparse en forma de pasteles de hielo, que luego se transforman en tortitas de hielo. Estas tortitas crecen y se crea una mezcla de frazil/tortita (Figura 1).

Si sobre la superficie del océano se observa una capa gris lechosa, consistente en hielo frazil y agua, esta mezcla se llama hielo graso. Consecuentemente, las tortitas se agrupan y se congelan a la vez. Si las olas están suficientemente amortiguadas por la capa de hielo frazil/tortita, se puede formar una capa de hielo cerrada. Para describir el mecanismo de amortiguación del océano y por lo tanto la evolución del hielo de mar como importante causante de los desarrollos del

NOTA \* Traducido del inglés por el ingeniero industrial Carlos Wrusch (carlos.wrusch@acinc.com) representante en España de Schleibinger Geräte..

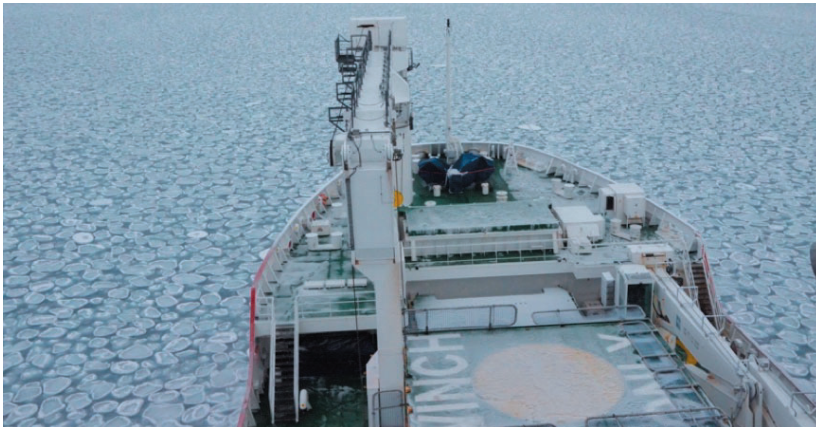


Figura 1. Mezcla de hielo frazil y hielo en forma de tortitas en la popa del 'Aguilhas II'.



Figura 2. El reómetro modelo eBT-V a bordo del 'Aguilhas II'.

clima, es necesario tener una precisa descripción de la viscosidad del hielo frazil.

El objetivo del experimento es lograr una muestra no manipulada de la capa superior del océano y determinar las propiedades reológicas del hielo frías. Los experimentos fueron hechos en el barco investigación 'Aguilhas II' de África del Sur, S.A. Los cruceros de SCALE fueron fundados por la South African National Research Foundation (NRF) a través del South Afri-

can National Antarctic Program (SANAP) con el apoyo del Departamento de Ciencias e Innovación y el Departamento de Asuntos Ambientales. El hielo frazil fue extraído del agua con una herramienta de propia construcción para su posterior medición. Para las mediciones de las propiedades reológicas del hielo frías hacía falta un reómetro robusto y sin cableados. Por consiguiente, el reómetro modelo eBT-V fue elegido para estas mediciones y por ello llevado para este viaje (Figura 2).

## 2. El reómetro móvil modelo eBT-V

Para las mediciones de las propiedades reológicas de fluidos se utilizan los reómetros. El reómetro eBT-V es un dispositivo de medición portátil moderno ideal para realizar mediciones en laboratorio o a pie de obra. Este reómetro fue diseñado especialmente para las mediciones de las propiedades del hormigón fresco con un tamaño máximo de partícula de hasta 32 mm y está disponible en el mercado desde hace años. El dispositivo combina dos tipos de reómetros para hormigón en uno y puede operar en dos modos diferentes: el modo 'P' y el modo 'V' (Figura 3).

Cuando el reómetro funciona en el modo 'P' se mide la fuerza en una sonda rígida pequeña. La sonda de medición (esférica o cilíndrica) se adjunta al dispositivo y rota alrededor de la varilla del centro [8]. Las propiedades, por ejemplo, del hormigón fresco pueden ser medidas sin ser necesario cizallar el hormigón y, por lo tanto, problemas como la segregación y la descomposición estructural durante las mediciones están considerablemente minimizadas.

Cuando el reómetro funciona en el modo 'V' la común geometría de paleta es una aproximación a la clásica geometría cilíndrica. Ya en 1939, Rusell sugiere la conocida geometría cilindro-cilindro para fluidos no newtonianos para eliminar "la posibilidad de deslizamiento" [9]. Primero Enzler [10] y después Koehler y Fowler [11], sugirieron esta clase de geometría para las mediciones del hormigón fresco fluido. En los últimos años, la geometría de la paleta ha ganado popularidad. Usada desde hace tiempo en la industria de la alimentación [12-14], esta geometría de sonda es utilizada cada vez más en la investigación de los sistemas en base de cemento. [15-17]. Debido al accionamiento de velocidad variable instalado, es posible realizar diferentes ajustes de velocidad. Además, se puede diseñar perfiles constantes, diferentes escalonados y perfiles en rampa.



Figure 3. El reómetro eBT-V y representación esquemática de sus dos modos de operación: 'P' y 'V'.

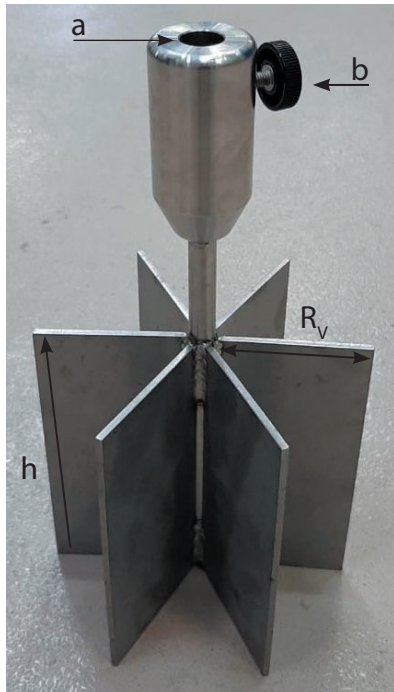


Figura 4. Sonda de paletas para mediciones en el modo 'V'.

cidad angular y el par de torsión según el modelo de Bingham, que se usa para describir el comportamiento de fluencia de los fluidos viscoplásticos, mostrando el límite de elasticidad. Utilizando una sonda paleta, el cálculo del par de torsión al esfuerzo de cizalla puede hacerse con el modelo de Keentok [18] y Barnes [15] o también con la ecuación de Reiner-Riwlin [16 y 19]. Un simple control mediante un "smartphone" permite una rápida y simple operación del dispositivo, así como una rápida transmisión de datos y una visualización gráfica de los resultados. También se puede usar el reómetro eBT-V para mediciones en el modo 'V'. El dispositivo se fija sobre el soporte y la sonda de paleta se fija sobre el eje del dispositivo (Figura 4, a) con un tornillo negro

(Figura 4, b). El recipiente para las mediciones se llena con la muestra y la sonda de paleta se coloca dentro de la muestra. Las dimensiones de la sonda de paletas usada son  $R_v = 51,5$  mm y  $h = 103$  mm.

### 3. Mediciones reológicas

El reómetro fue usado para las mediciones de tres muestras diferentes de hormigón fresco. El hormigón designado como muestra '1', es un hormigón auto-compactante (SCC) con una caída del flujo de 680–720 mm y un tamaño máximo de aglomerado de 12 mm. La muestra de hormigón '2', contiene menos agua pero mayor contenido de cemento en comparación con la muestra '1'. Por consiguiente, la consistencia de la segunda mezcla es más viscosa y la caída del flujo es de 500–550 mm. El tamaño máximo del aglomerado en la muestra '2' fue de 20 mm.

La muestra de hormigón '3' fue preparada con hormigón con un bajo volumen de pasta y un aumento en el contenido de aglomerado áspero comparado con la muestra de hormigón '1'. El tamaño máximo del aglomerado usado fue de 12 mm. La caída del flujo de la muestra '3' fue ajustada a 550–600 mm.

Una suspensión de discos como plaquetas de cristales de hielo, denominado frazil, fue elaborada en el laboratorio de la Universidad de Essen. La salinidad del hielo frazil artificial fue ajustada a un 3,5% y la temperatura medida en el intervalo de  $-3,6$  °C a  $-4,05$  °C.

Para las mediciones de las muestras de hormigón se utiliza un perfil de escalona-

do con velocidad de cizalla de 2 rev./min. Las mediciones de los hormigones se hicieron inmediatamente después de mezclarlos con agua. La segunda medición de la mezcla de hormigones fue hecha después de 30 minutos de reposo. Comparado con las mediciones del hormigón con perfil para velocidad de cizalla constante, para la medición de la muestra del hielo frazil se modificó el perfil de la rampa incrementando la velocidad de cizalla hasta 4 rev/min. Los datos de la velocidad y el par de torsión fueron registrados. En cada medición aparece el par máximo en los primeros segundos de medición. Del par máximo, y conocida la geometría del dispositivo de medición, se puede calcular el límite de elasticidad. Además, la velocidad de floculación del hormigón, Athix, puede calcularse [20]. Los resultados de las muestras de hormigón aparecen reflejadas en la Figure 5 y los resultados de las mediciones de las muestras de hielo se muestran en la Figura 6.

Las investigaciones sobre el límite de elasticidad y su desarrollo en el tiempo para materiales basados en cemento muestra el efecto de la tixotropía debido a la acumulación estructural. Dependiendo de la hidratación del cemento, así como del crecimiento convergente de los productos de hidratación, el límite de elasticidad se incrementa con el tiempo. Después de 30 minutos de reposo, el límite de elasticidad de las muestras de hormigón han aumentado por un factor de 2,1 para el hormigón '1', factor 2,2 para el hormigón '2' y un factor 2,3 para el hormigón '3'.

La velocidad de floculación es el factor para el incremento del límite de elasticidad a lo largo del tiempo y será aplicado,

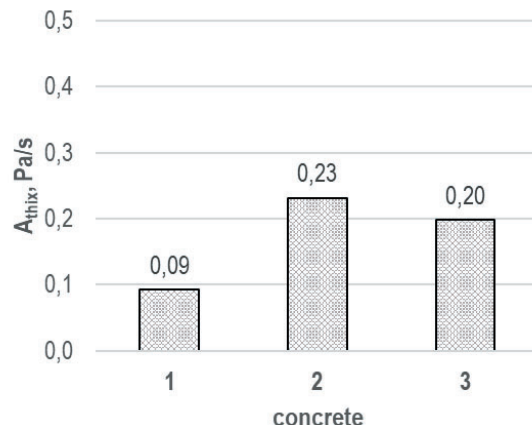
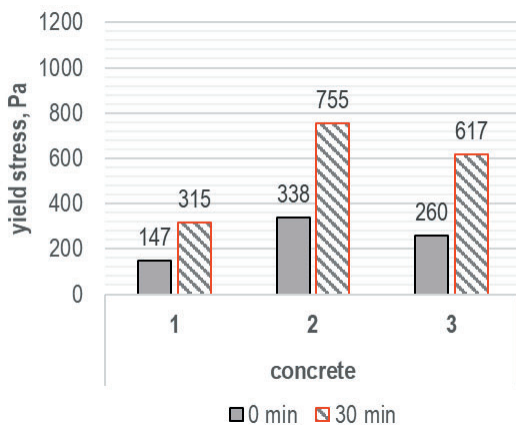


Figure 5. El límite de elasticidad calculado de las mediciones de mezclas de hormigón en tiempos diferentes (izquierda) y la velocidad de floculación,  $A_{thix}$  (derecha).

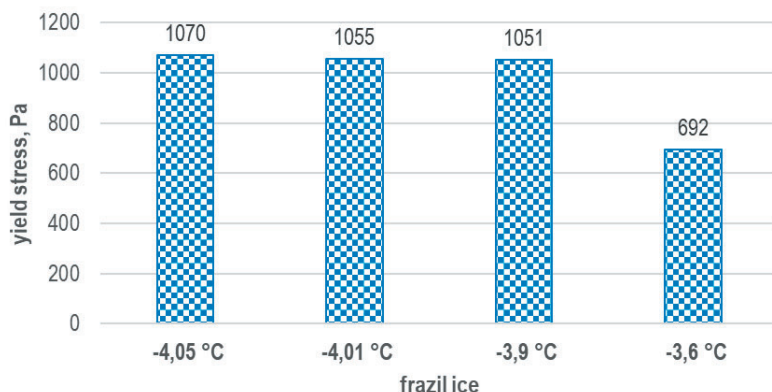


Figura 6. El límite de elasticidad calculado de las muestras de hielo frazil a diferentes temperaturas.

por ejemplo, para el cálculo de la presión relativa de encofrado durante la colada. De los datos obtenidos se puede considerar el hormigón '1' como un hormigón autocompactante no tixotrópico con baja velocidad de floculación de  $A_{thix} < 0,1$  Pa/s. El hormigón '2' y el hormigón '3' se pueden considerar como mezclas tixotrópicas con una velocidad de floculación normal.

Comparando el límite de elasticidad del hormigón y del hielo frazil medido, se observan los valores en el intervalo de 690 Pa a 1.070 Pa, que son comparables con los del hormigón después de algún tiempo de hidratación. Además, se ha comprobado que el límite de elasticidad depende de la temperatura del hielo. Por lo tanto, hay que seguir investigando.

## 4. Resumen y conclusión

Las mediciones reológicas son muy importantes y describen los comportamientos de fluidos y suspensiones. El reómetro móvil modelo eBT-V de la empresa alemana Schleibinger fue desarrollado para la medición de suspensiones con un tamaño máximo de partículas de hasta 32 mm y se utiliza para mediciones reológicas de hormigón fresco.

Además, el reómetro móvil para hormigón modelo eBT-V ha sido probado para ser también un dispositivo viable para estudios del hielo frazil. Las similitudes, pero también las diferencias de estos materiales, pueden verse en los resultados de las mediciones. El dispositivo puede utilizarse tanto en condiciones ambientales normales como bajo condiciones extremas y bajas temperaturas como en

la Antártida. Los detalles de los datos reológicos recogidos en la zona helada marginal de la Antártida y su implicación en la formación de hielo, será presentado en otro artículo.

## 5. Referencias

[1] M. Yang, C.M. Neubauer y H.M. Jennings. "Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions". *Adv. Cem. Based Mater.*, 5 (1), 1997, 1-7.

[2] H. Uchikawa, S. Hanehara y D. Sawaki. "Effect of electrostatic and steric repulsive forces of organic admixture on the dispersion of cement particles in fresh cement paste". 10º Congreso Internacional de la Química del Cemento, volumen 3, 1997.

[3] S. Hanehara y K. Yamada. "Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, adsorption behavior of admixture and paste rheology". *Cem. Concr. Res.*, 29, 1999, 1159-1165.

[4] R.J. Flatt y F.A. Houst. "A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticisers". *Cem. Concr. Res.* 31, 2001, 1169-1176.

[5] M.J. Doble. "Pancake ice formation in the Weddell Sea". *J. Geophys. Res.*, vol. 108, nº C7, 2003.

[6] C. Petrich y H. Eicken. "Overview of sea ice growth and properties in Sea Ice". Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd, 2016, pp. 1-41.

[7] M. Vichi et al. "Effects of an Explosive Polar Cyclone Crossing the Antarc-

tic Marginal Ice Zone". *Geophys. Res. Lett.*, pp. 1-24, 2019.

[8] F. Fleischmann y W. Kusterle. "A new concrete rheometer for the assessment of the rheological properties of Self-Compacting Concrete". *Proceedings SCC 2013*, 2013.

[9] J.L. Russell. "Studies in Thixotropic Gelation, II - The Coagulation of Clay Suspensions". *Proc. Roy. Soc. London, Series A*, 154, 1936, 550-560.

[10] R. Enzler y E. Lemcke et. al. "Device for testing unset concrete and mortar". Patente CH19910002526 and US5541855, 1991.

[11] E.P. Koehler y D.W. Fowler. *Summary of Concrete Workability Test Methods*. International Center for Aggregates Research, Universidad de Texas en Austin, 2003.

[12] ASTM D2573-01, Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil.

[13] J.F. Steffe. "Rheological Methods in Food Process Engineering". Freeman Press, East Lansing, 1992.

[14] T.A. Glenn III, K.M. Keener y C.R. Daubert. "A mixer viscometry approach to use vane tools as steady shear rheological attachments". *Appl. Rheol.*, 10 (2), 2000, 80-89.

[15] H.A. Barnes y Q.D. Nguyen. "Rotating vane rheometry - a review". *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 98, 2001, 1-14.

[16] D. Feys, J.E. Wallevik, Y. Ammar, K.H. Khayat y O.H. Wallevik. "Extension of the Reiner-Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers". *Mater. Struc.*, 46, 2013, 289-311.

[17] A. Rabia, S. Yahiaoui, M. Djabourov, F. Feuillebois y T. Lasuye. "Optimization of the vane geometry". *Rheol. Acta.*, 42 (2014) 357-371.

[18] M. Keentok. "The measurement of the yield stress of liquids". *Rheol. Acta*, 21, 1982, 325-332.

[19] M. Reiner. "Deformation and flow. An elementary introduction to theoretical rheology". H.K. Lewis & Co. Limited, 1949.

[20] N. Roussel. "A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications". *Cem. Concr. Res.*, 36, 2006.