

# Influencia de las burbujas en la viscosidad de magmas haplograníticos vesiculados

*Bubble effects on the viscosity of vesiculated haplogranitic magmas*

S. López <sup>(1)</sup>, C. Fernández <sup>(2)</sup>, T. Donaire <sup>(1)</sup> y A. Castro <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, 21071-Huelva.

<sup>(2)</sup> Departamento de Geodinámica y Paleontología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, 21071-Huelva.

## ABSTRACT

*The changes in the viscosity of bubble-bearing haplogranitic magmas with crystallinity are a prime function of the applied deformation rate. Under high deformation rates melt and magma viscosities are found to strongly increase with crystallinity. Low deformation rates promote, instead, a decrease in melt viscosity and a rather small increase in magma viscosity with crystallinity. These changes could explain some observed geological features in plutons.*

**Key words:** Haplogranitic magmas, bubbles, viscosity, rheology.

*Geogaceta*, 33 (2003), 95-97  
ISSN:0213683X

## Introducción

Un magma es un sistema compuesto por un fundido silicatado y un conjunto de elementos en suspensión. Estos últimos incluirán esencialmente, a los efectos de este estudio, cristales y burbujas procedentes de la exsolución de volátiles en el magma. En adelante, con la palabra fundido nos referiremos a la fracción no cristalina y no vesicular del sistema magmático. Por tanto, la supondremos equivalente al término inglés *melt*. En este trabajo se analiza la variación en el comportamiento reológico de fundidos y de magmas haplograníticos que cristalizan. Los resultados obtenidos confirman los ya conocidos en la bibliografía especializada (Scaillet *et al.*, 1997), y los complementan en algunos aspectos importantes. En este sentido, se estudia el efecto reológico de las burbujas que se producen al alcanzarse y sobrepasarse el nivel de saturación de agua en el fundido, a medida que el magma cristaliza.

## Metodología

El primer objetivo de este trabajo es obtener la variación de la viscosidad de los fundidos haplograníticos en una cámara magmática a medida que desciende la temperatura y el magma va cristalizando. Se asumirá que la cámara se encuen-

tra sometida a una presión de 5 kbar. Desde el punto de vista reológico, los fundidos silicatados presentan un comportamiento viscoelástico (Dingwell *et al.*, 1993). No obstante, en la mayor parte de los contextos geológicos, y con excepción de procesos extraordinariamente energéticos como las erupciones explosivas, predominará el componente viscoso newtoniano. La viscosidad de los fundidos haplograníticos hidratados se ha determinado mediante la ecuación de Hess y Dingwell (1996). Dicha expresión relaciona la viscosidad con la temperatura y con el contenido de agua en el fundido. Se han considerado porcentajes iniciales de agua en el sistema que varían entre el 2 y el 6% en peso (Clemens, 1984). Sin embargo, conforme avanza el proceso de cristalización en el sistema magmático, y asumiendo que cristalizan fases anhidras, la concentración de agua en el fundido aumenta. Por tanto, resulta necesario establecer la variación de la cristalinidad (fracción volumétrica de cristales) con la temperatura. Para ello se ha utilizado la aproximación semiempírica de Marsh (1981). Los valores de temperatura considerados para el *solidus* y *liquidus* del sistema se han obtenido de Johannes y Holtz (1996).

A continuación, se ha determinado la variación en la viscosidad del magma, conocida la del fundido silicatado y

el porcentaje de cristales presente en cada momento. El comportamiento reológico de sistemas complejos como los magmáticos no es fácil de establecer. La aproximación clásica ha consistido en la definición de una serie de umbrales, expresados como valores críticos de cristalinidad, entre los cuales el magma supuestamente presenta un comportamiento específico (Vigneresse *et al.*, 1996). En este estudio se ha adoptado la aproximación de Dingwell *et al.* (1993), que considera que los magmas graníticos pueden ser concebidos, en primera aproximación, como fluidos newtonianos para cristalinidades comprendidas entre 0 y 0.6-0.65. Es decir, hasta un 65% de cristales, cifra ligeramente superior al umbral de percolación rígida de Vigneresse *et al.* (1996). Aun así, no existen modelos teóricos para obtener la viscosidad del magma, sino ecuaciones empíricas o semi-empíricas cuya aplicabilidad depende del porcentaje de cristales considerado. Para cristalinidades inferiores a 0.1 se ha utilizado la ecuación de Einstein (1911). Por otro lado, se ha utilizado la fórmula de Einstein-Roscoe (Einstein, 1911; Roscoe, 1952) para cristalinidades comprendidas entre 0.1 y 0.3. Finalmente, se ha empleado la ecuación de Dingwell *et al.* (1993) para cristalinidades superiores a 0.3.

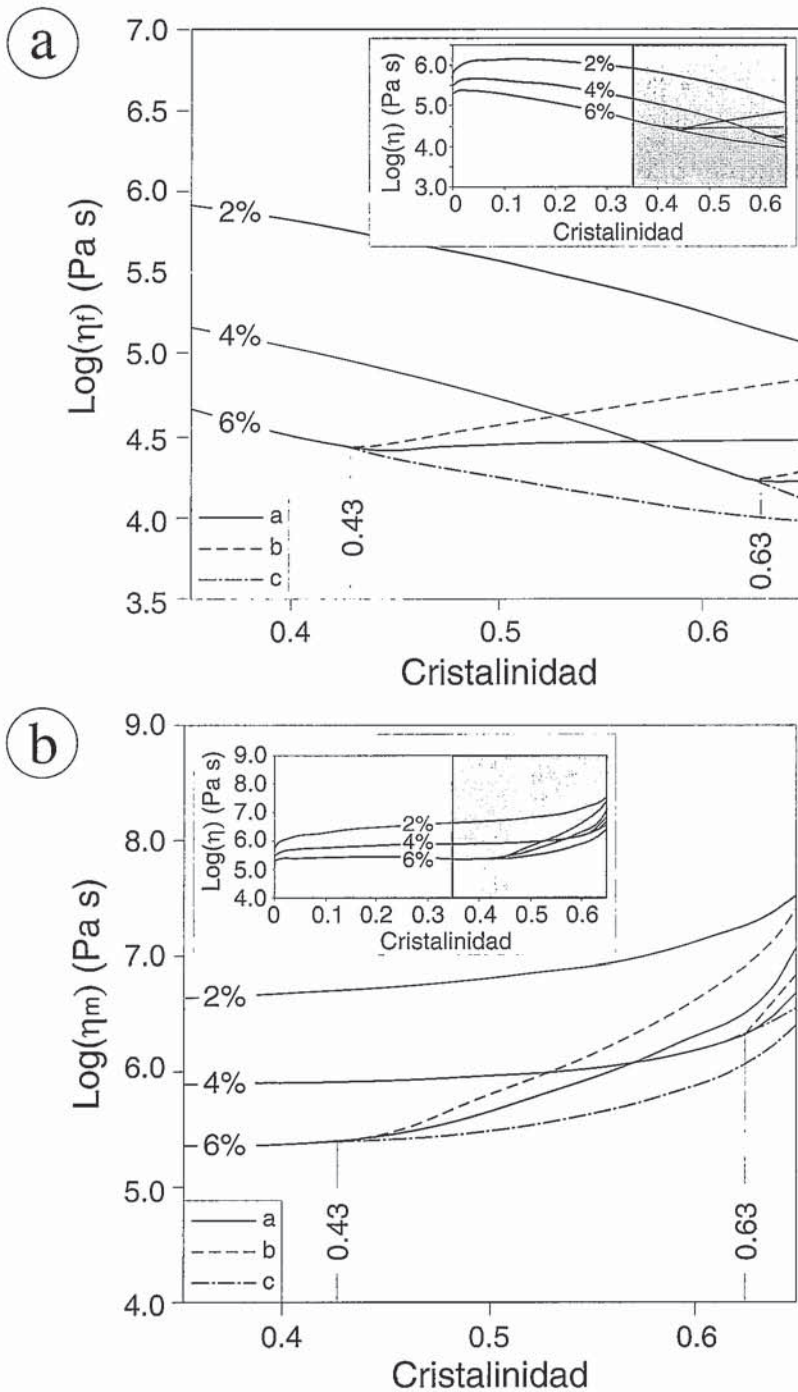


Fig. 1.- a) Variación de la viscosidad del fundido ( $\eta_f$ ) con respecto a la cristalinidad. La figura recuadrada muestra la curva de variación de la viscosidad para cristalinidades entre 0 y 0.65. La figura principal corresponde a una ampliación de la zona comprendida en el intervalo de cristalinidades entre 0.35 y 0.65 (en gris en el recuadro). El porcentaje situado sobre cada curva indica el porcentaje en peso de agua inicial. Las líneas verticales marcan los valores de cristalinidad para los que se produce la saturación en agua del fundido. La línea "a" señala la variación de la viscosidad sin tener en cuenta el efecto de las burbujas. La influencia de las burbujas está marcada por las líneas "b" (alta tasa de deformación) y "c" (baja tasa de deformación). b) Variación de la viscosidad del magma ( $\eta_m$ ) con respecto a la cristalinidad.

Fig. 1.-a) Changes in melt viscosity ( $\eta_f$ ) versus crystallinity. The represented range of crystallinities (0.35-0.65) corresponds to the grey pattern in the inset, which shows the entire considered variation in crystallinity. The initial water contents are shown as wt.% on the curves. Vertical lines mark the  $H_2O$ -saturation condition of melts. "a" curves represent the viscosity changes obtained for a melt under bubble-absent conditions. "b" and "c" curve segments illustrate the effects on viscosity of bubbles under high and low deformation rates, respectively. b) Same as Fig. 1a for changes in magma viscosity ( $\eta_m$ ).

Los valores críticos de contenido en agua a partir de los cuales el fundido puede considerarse como saturado son los indicados por Johannes y Holtz (1996). Estos valores se alcanzan al aumentar la cristalinidad del sistema, como consecuencia de la reducción en la fracción volumétrica de fundido. El agua en exceso, es decir, en fracciones superiores al valor crítico, dará lugar a la nucleación de burbujas. La fracción volumétrica de burbujas es función únicamente del porcentaje en peso del agua en exceso y del cociente entre la densidad del fundido y la de las burbujas (López, 2002). La densidad del fluido que rellena las burbujas depende a su vez de los iones disueltos en el agua. En este trabajo se ha asumido arbitrariamente un valor de 2 para dicho cociente. Este valor indica que la densidad de las burbujas es la mitad de la densidad del fundido. La aparición de burbujas en el fundido tiene profundos efectos en su viscosidad. El parámetro que expresa el comportamiento de las burbujas ante un campo de esfuerzos es el llamado tiempo de relajación (Bagdassarov y Dingwell, 1992). El tiempo de relajación depende de la viscosidad del fundido, del radio de las burbujas y de la tensión interfacial vapor-fundido. La forma en la que las burbujas influyen en la reología del fundido es función de la inversa del tiempo de relajación, que puede considerarse como un valor crítico para el flujo de magmas con burbujas. Si la tasa de la deformación impuesta sobre el sistema es inferior a la inversa del tiempo de relajación, las burbujas se deformarán con facilidad, y las viscosidades de fundido y magma descenderán. En este caso, sería aplicable la ecuación experimental de Bagdassarov y Dingwell (1992), que permite obtener la viscosidad del fundido con burbujas conocida la fracción volumétrica de burbujas. Por el contrario, para tasas de la deformación superiores al valor crítico, las burbujas se comportan como cuerpos rígidos, e incrementan las viscosidades de fundido y magma. Los experimentos de Stein y Spera (1992) ofrecen una ecuación que permite obtener la viscosidad del fundido en estas circunstancias. Por su parte, Scaillet *et al.* (1998) indican que, para los fundidos graníticos, el valor de la inversa del tiempo de relajación se situaría en  $10^{-2} s^{-1}$ .

**Resultados**

La variación de la viscosidad de fundidos haplograníticos como consecuencia del aumento en la cristalinidad

se muestra en la Fig. 1a. Los fundidos parten de viscosidades comprendidas entre  $10^5$  y  $10^6$  Pa s, dependiendo del contenido inicial de agua, y el efecto de la concentración de agua en el fundido residual se manifiesta en el descenso acusado de la viscosidad al aumentar la cristalinidad. Sin considerar el efecto de las burbujas, la viscosidad del fundido comienza a aumentar ligeramente cuando se alcanza su saturación en agua (líneas a de la Fig. 1a). Esto es producto de la relación directa existente entre el aumento de la cristalinidad y el descenso de la temperatura. Sin embargo, para valores de cristalinidad correspondientes a la saturación del magma (líneas verticales en la Fig. 1a), el progreso de la viscosidad debe depender del comportamiento de las burbujas. Cuanto mayor sea el contenido inicial de agua, mayor será el efecto reológico de las mismas. En magmas con porcentajes iniciales de agua del 2% en peso, no se alcanza la saturación del sistema para las cristalinidades consideradas en este trabajo. Por su parte, para el 6% en peso de agua inicial, la viscosidad del fundido puede aumentar con la cristalinidad una vez superado el umbral de saturación (43% de cristalinidad) si la tasa de deformación supera al valor crítico (línea b de la Fig. 1a), o decrecer con el aumento de la cristalinidad para bajas tasas de deformación (línea c de la Fig. 1a). La saturación se alcanza para un 63% de cristalinidad en magmas con un 4% en peso de agua inicial, lo que supone que la influencia de las burbujas, que sigue el mismo patrón que en el caso anterior, se limita a un campo de cristalinidades más reducido. El descenso en la viscosidad del fundido puede llegar a alcanzar 1.5 órdenes de magnitud en el caso más favorable de los estudiados.

En lo referente al comportamiento del sistema magmático en su conjunto, es de destacar la estabilidad del valor de viscosidad para amplios rangos de cristalinidades (Fig. 1b). Este hecho es una consecuencia del equilibrio entre los efectos del descenso de la temperatura, del aumento en el porcentaje de cristales

y de la disminución de la viscosidad del fundido. Resulta también muy patente el incremento exponencial en la viscosidad que se produce por encima del 40% de cristales, dependiendo del contenido de agua inicial (curvas "a" de la Fig. 1b). Por otro lado, la presencia de burbujas puede acentuar este incremento si la tasa de la deformación es elevada (curvas "b", Fig. 1b), o aminorarlo si la tasa de deformación es baja (curvas "c", Fig. 1b).

#### Discusión y conclusiones

Las curvas representadas en la Fig. 1 son geoméricamente similares a algunos de los patrones obtenidos por Scaillet *et al.* (1997). Sin embargo, y esta es la aportación principal de este trabajo, dichos autores no consideran la influencia reológica de las burbujas. Avanzaremos ahora brevemente algunas de las implicaciones geológicas que puede tener este efecto. En el caso del fundido, la influencia de las burbujas es determinante, porque puede implicar un descenso pronunciado en su viscosidad si se verifican las condiciones adecuadas (Fig. 1a). En este caso, los cristales podrían moverse con mayor facilidad en la cámara magmática, favoreciéndose su separación del fundido, que reuniría mejores condiciones para fluir y escapar de la cámara magmática. Este comportamiento podría ser importante en el desarrollo de procesos como la cristalización fraccionada. Por otra parte, asumiendo que no se verifica la separación de los cristales, el sistema magmático en su conjunto podría presentar viscosidades inferiores a  $10^6$  Pa s para cristalinidades cercanas o superiores al 60%. A partir de aquí, un pequeño aumento en la cristalinidad implicaría un cambio brusco en el comportamiento reológico del magma, que pasaría de manera casi inmediata a deformarse como un sólido de viscosidad infinita. Pequeñas variaciones espaciales y temporales en la cristalinidad podrían explicar la secuencia de estructuras visibles en algunos plutones graníticos, en los que las fábricas magmáticas indicativas de viscosidades bajas o moderadas, son atravesadas por fracturas desa-

rolladas en continuidad temporal con ellas, y también en estado magmático (Fernández *et al.*, 1997). Todos estos efectos serán tanto más patentes cuanto mayor sea el contenido inicial de agua en el magma.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto BTE2001-2769, por la Junta de Andalucía (Grupo RNM-120) y por la Universidad de Huelva (Plan Propio de Investigación).

#### Referencias

- Bagdassarov, N.S. y Dingwell, D.B. (1992): *Jour. Volcanol. Geoth. Res.*, 50, 307-322.
- Clemens, J.D. (1984) *Lithos*, 17, 273-287.
- Dingwell, D.B., Bagdassarov, N.S., Busod, G.Y. y Webb, S.L. (1993): *Mineral. Assoc. Canada, Short Course Handbook*, 21, 131-196.
- Einstein, A. (1911): *Annales Physicae*, 19, 289-306.
- Fernández, C., Castro, A., De la Rosa, J.D. y Moreno-Ventas, I. (1997): En: Granite, from segregation of melt to emplacement fabrics. Bouchez, J.L., Hutton, D.H.W. y Stephens, W.E. (Eds). Kluwer, Dordrecht, 75-91.
- Hess, K.U. y Dingwell, D.B. (1996): *Amer. Miner.*, 81, 1297-1300.
- Johannes, W. y Holz, F. (1996): Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks. *Springer*, Berlin.
- López, S. (2002): *Seminario de Investigación de Tercer Ciclo*, Universidad de Huelva, 86 pp.
- Roscoe, R. (1952): *Br. Journ. Appl. Phys.*, 3, 267-269.
- Scaillet, B., Holtz, F. y Pichavant, M. (1997): En: Granite, from segregation of melt to emplacement fabrics. Bouchez, J.L., Hutton, D.H.W. y Stephens, W.E. (Eds). Kluwer, Dordrecht, 11-29.
- Stein, D.J. y Spera, F.J. (1992): *Jour. Volcanol. Geoth. Res.*, 49, 157-174.
- Vignerresse, J.L., Barbey, P. y Cuney, M. (1996): *Jour. Petrol.*, 37, 1579-1600.