

Viscosidad en fundido.

¿Qué es la viscosidad?

La viscosidad es una propiedad de los fluidos y expresa su resistencia u oposición al deslizamiento entre sus moléculas cuando actúa una fuerza ⁽¹⁾. Los esmaltes en fundido se comportan como fluidos, por lo tanto, cuando se hace referencia a su resistencia a la deformación se expresa como “viscosidad en fundido del esmalte”.

En general, la viscosidad (η) de un fluido es una medida del rozamiento interno o la resistencia al deslizamiento que existe entre sus moléculas. Se expresa como la relación existente entre la fuerza por unidad de superficie necesaria para deformar el fluido -llamada esfuerzo cortante (τ)- y la deformación obtenida o gradiente de velocidades ($\dot{\gamma}$) (velocidad por unidad de longitud).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

En el Sistema Internacional de unidades la viscosidad se expresa en Pascales por segundo: $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$ que equivale a 10 ps (10 poises). No obstante, con frecuencia se utiliza el submúltiplo dPa-s, que equivale a un Poise que es la unidad de medida de la viscosidad en el sistema cegesimal.

¿Qué influencia tiene la viscosidad en fundido del esmalte?

En general la viscosidad en fundido influye en las siguientes características de los esmaltes:

- Influye en la reactividad del esmalte con el soporte y por tanto en la formación de interfase entre ambos.
- Influye en la reactividad del esmalte con las partículas cristalinas presentes en el esmalte fundido (pigmentos, materias primas, cristales formados, etc.). A medida que aumenta la temperatura del esmalte aumenta su reactividad.
- La viscosidad en fundido controla la uniformidad del espesor de la capa de vidriado y su estirado. Una baja viscosidad en fundido puede producir el escurrido de esmaltes aplicados en vertical.
- Una baja viscosidad en fundido favorece la aparición de cristales (cristalización) en esmaltes de cinc y/o de calcio.
- Una baja viscosidad en fundido favorece la [eliminación de las burbujas y el cierre de cráteres](#) que se puedan generar en el vidriado.

¿Qué influye en la viscosidad en fundido del esmalte?

El valor de la viscosidad en fundido depende de la temperatura y de la composición del esmalte.

Influencia de la temperatura.

La viscosidad en fundido disminuye al aumentar la temperatura.

Influencia de la composición del esmalte.

La composición de los esmaltes determina su viscosidad en fundido, de manera que pequeños cambios en un componente pueden generar fuertes variaciones de la viscosidad en fundido del esmalte (**).

En general, la viscosidad del esmalte es tanto mayor cuanto mayor sea la proporción de formadores de red (SiO_2) o de estabilizadores (Al_2O_3) respecto a la de los modificadores (alcalinos, alcalinotérreos, ZnO , PbO , etc.). Sin embargo, el B_2O_3 , que es también formador de red, reduce marcadamente la viscosidad a elevadas temperaturas y, en cambio, a bajas temperaturas la aumenta si se encuentra en el esmalte en contenidos inferiores al 20 %. Este efecto es conocido como “anomalía del boro” ⁽¹⁾.

Si se aumenta la proporción de óxidos alcalinos en el esmalte, se debilita la estructura vítrea y, por tanto, disminuye la viscosidad en fundido del esmalte. Esta disminución es más sensible a bajas concentraciones de alcalinos, aproximadamente a valores inferiores al 12 % en moles ⁽¹⁾, no siendo tan acusada a partir de este valor. En las mismas condiciones, la viscosidad de un esmalte disminuirá en el siguiente orden:

Mayor viscosidad ... $K^+ > Na^+ > Li^+$ menor viscosidad

Esta relación se invierte en vidriados con una proporción molar de alcalinos superior al 40 % ⁽¹⁾.

Los óxidos alcalinotérreos disminuyen la viscosidad en el siguiente orden ⁽¹⁾:

Mayor viscosidad ... $Ba^{2+} > Sr^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ menor viscosidad

El Ca^{2+} disminuye la viscosidad de los esmaltes a elevadas temperaturas, en cambio temperaturas próximas a la temperatura de reblandecimiento la aumenta ⁽¹⁾.

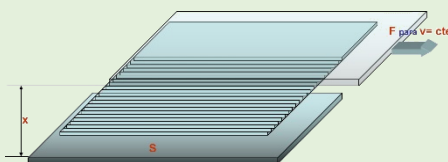
El Zn^{2+} tiene un comportamiento semejante al calcio. Disminuye la viscosidad a temperaturas elevadas mientras que la aumenta a temperaturas próximas a la temperatura de reblandecimiento ⁽¹⁾.

El Pb^{2+} reduce siempre y de forma muy apreciable la viscosidad en fundido de los esmaltes.

¿Quieres saber más?

Ley de Newton de la viscosidad.

Si se considera el fluido contenido entre dos grandes láminas planas y paralelas de superficie S , separadas entre sí por una distancia muy pequeña x y se mantiene en movimiento, una de las dos láminas según se muestra en la figura, con una velocidad constante v , se establece, en régimen estacionario, un perfil de velocidades en el fluido.



Para que esta situación se permanezca, es necesario mantener la misma fuerza (F) sobre la lámina inferior en la dirección indicada en la figura. Esta fuerza, referida a la unidad de superficie (F/S) se denomina "esfuerzo cortante" (τ) viene dada por la expresión:

$$\frac{F}{S} = \eta \cdot \frac{v}{x}$$

En la que:

- F: Fuerza aplicada (N)
- S: Superficie de las láminas (m²)
- η : Viscosidad del medio (Pa.s)
- v: Velocidad (m/s)
- x: Distancia entre placas (m)

En esta ecuación η es la constante de proporcionalidad y representa la fricción interna del material, que es una medida de la resistencia al flujo, y se denomina viscosidad. Esta expresión puede representarse también de la siguiente forma:

$$\tau = \eta \cdot \gamma$$

en la que τ representa esfuerzo cortante o fuerza de cizalla y γ el gradiente de velocidades o velocidad de cizalla.

Los fluidos que siguen esta ley se denominan "fluidos newtonianos" (por ejemplo agua, gasolina, glicerina, etc.). En ellos la viscosidad solo depende de la temperatura y de la composición o naturaleza del fluido y por tanto su viscosidad a una determinada temperatura se denomina "viscosidad absoluta". **Los vidrios y esmaltes fundidos son fluidos newtonianos.**

Relación entre viscosidad y temperatura.

Es posible calcular la viscosidad a una temperatura determinada, o interpretar, de forma general el comportamiento viscoso real de los esmaltes mediante el uso de diversas fórmulas empíricas. De todas ellas la más frecuentemente empleada es la de Vogel-Fulcher-Tamman ⁽¹⁾ ⁽²⁾:

$$\log \eta = -A + \frac{B}{T - T_0}$$

Las tres constantes A, B y T₀, de esta expresión son independientes de la temperatura. Su medida para cada vidriado requiere conocer tres parejas de valores viscosidad-temperatura, para lo cual se suele recurrir a la determinación de tres puntos fijos de viscosidad o pueden utilizarse las ecuaciones propuestas por sus autores y recogidas por Fernández Navarro ⁽¹⁾:

$$A = 1,455 - 1,4778 \cdot a_{Na_2O} + 0,8350 \cdot a_{K_2O} + 1,603 \cdot a_{CaO} + 5,4936 \cdot a_{MgO} - 1,5183 \cdot a_{Al_2O_3}$$

$$B = 5736,4 - 6039,7 \cdot a_{Na_2O} - 1439,6 \cdot a_{K_2O} - 3919,3 \cdot a_{CaO} + 6285,3 \cdot a_{MgO} + 2253,4 \cdot a_{Al_2O_3}$$

$$T_0 = 198,1 - 25,07 \cdot a_{Na_2O} - 321,0 \cdot a_{K_2O} + 544,3 \cdot a_{CaO} - 384,0 \cdot a_{MgO} + 294,4 \cdot a_{Al_2O_3}$$

Los valores de a_i se expresan en moles de cada componente por cada mol de SiO₂ en la composición del esmalte.

Bibliografía

- (1) FERNANDEZ NAVARRO, J. M. "El vidrio". Colección Textos Universitarios. Vol VI. 2ª Ed. Pg. 337 a 361 Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Madrid, 1991.
- (2) ENRIQUE NAVARRO, J.E.; NEGRE MEDALL, F. "Tecnología cerámica. Vol. 5. Esmaltes cerámicos". Pgs. 918 a 924. Universidad de Valencia. València, 1985.