

# LA MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL A ALTAS TEMPERATURAS SOBRE MUESTRAS DE VIDRIO, A TRAVÉS DEL DROP ANALYSIS (ANÁLISIS DE LA GOTA)

Mariano Paganelli

Premisa

La medición de la tensión superficial sobre vidrio a altas temperaturas causa siempre problemas, debido a las dificultades inherentes de la medición. La tensión superficial no puede medirse directamente sino que necesita ser computada matemáticamente a partir de la medición de otras propiedades físicas.

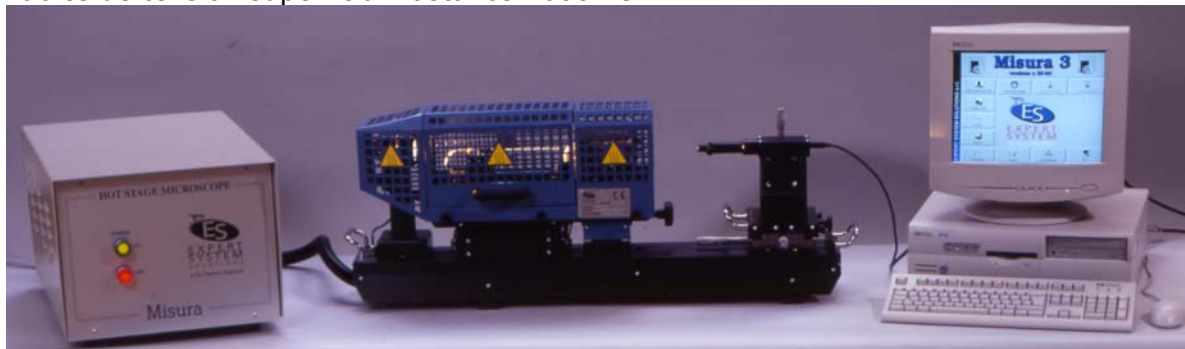
Métodos como la escala de torsión con el anillo de platino, o el del peso de la gota, que se usan a menudo para medir la tensión superficial sobre líquidos a temperatura ambiente, son bastante difíciles de aplicar sobre vidrio fundido. En la industria vítrea, la medición de la tensión superficial se realiza comúnmente usando el método del cable pendiente calentado con un gancho de platino. Este método es bastante simple y económico, pero carece del control de la temperatura, además de que es imposible realizar la prueba a más de una o a distintas temperaturas.

En los últimos 20 años, un nuevo método para la medición de la tensión superficial ha ido obteniendo cada vez más crédito, aunque éste ha sido concebido hace ya más de 200 años. Los dos genios matemáticos Laplace y Young escribieron la ecuación que describe la forma de la superficie de separación entre dos fluidos como una función entre la densidad de los dos fluidos y la de la tensión superficial. Esta ecuación, conocida como Young-Laplace, puede utilizarse para computar la tensión superficial de una gota de líquido, conociendo la densidad a la temperatura de la medición y analizando la forma de la gota.

En la actualidad existen varios instrumentos disponibles en el mercado que realizan la medición de la tensión superficial que se basan en este principio, pero todos ellos trabajan solamente por debajo de unos pocos centenares de grados.

El nuevo Drop Analysis (Análisis de la Gota)

Expert System Solutions ha creado recientemente la medición de la tensión superficial basada en el análisis de la forma de la gota aplicando la ecuación de Young-Laplace sobre su microscopio térmico MISURA 3. Este nuevo instrumento hace posible el registro de mediciones confiables de tensión superficial hasta los 1600 °C.



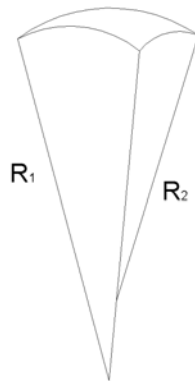
**Fig. 1: El microscopio térmico MISURA 3 de Expert System Solutions**

Para obtener este resultado, se desarrolló un nuevo algoritmo, basado en los conceptos matemáticos siguientes.

Dentro de una gota de líquido, la presión en la superficie cóncava del lado interior es más alta que la presión de la superficie convexa exterior, y la diferencia de las dos presiones depende de la tensión interfaz y del radio de curvatura de la superficie. En el caso de una gota que yace sobre una superficie (gota sésil), la superficie no es esférica pero tiene una simetría axial y en cada punto la curvatura se puede describir usando dos radios de curvatura sobre planos normales.

Así, la ecuación Young-Laplace adquiere la siguiente forma:

$$p_1 - p_2 = \gamma \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

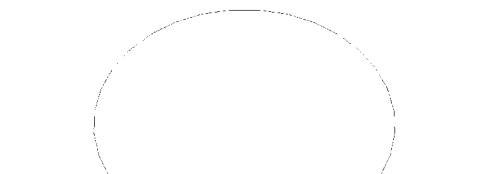


**Fig.2 En el caso de una gota sésil, hay dos radios de curvatura diferentes para cada punto de la superficie.**

Los primeros intentos se hicieron hace muchos años, utilizando esta ecuación para derivar el valor de  $\gamma$  a partir de imágenes tomadas con una cámara usando una simple tabla de conversión que expresa a  $\gamma$  como una función del diámetro máximo de la gota y el diámetro a la altura  $h$  igual a ese diámetro. Este método, conocido como la "Tabla Fordham" dio resultados imprecisos, debido a que el perfil de la gota se medía solamente en un punto. Como resultado final, el método de medición de la tensión superficial a partir del perfil de una gota obtuvo una mala reputación.

Recientemente, gracias a la velocidad extrema computacional de los procesadores de nueva generación, es posible computar exactamente el perfil completo de la gota, resolviendo la ecuación Young Laplace en todos y cada uno de los puntos del perfil. Las ecuaciones necesarias para la solución del problema se desarrollaron paso a paso por varios científicos, en el amplio arco de tiempo de los dos últimos siglos. El método que aplicamos se basa en la ecuación diferencial Bashforth-Adams, de la que se desconoce, desafortunadamente, su solución analítica.

A la solución se llega aplicando la integral numérica Runge-Kutta y luego, minimizando la desviación media al cuadrado, entre el perfil de la gota calculado y el real, hasta que el error sea inferior a  $10^{-4}$ .



**Fig. 3: Perfil de gota calculado con ordenador**

## El problema de la densidad

Después de haber resuelto el problema matemático, hay que enfrentar otro problema: hasta aquí podemos resolver la ecuación para todos los puntos del perfil de la gota, pero la diferencial de presión sobre las dos superficies de cada punto de la gota depende de la densidad de los dos fluidos.

El fluido alrededor de la gota es aire, y la densidad del aire a cualquier temperatura dada se puede encontrar en la literatura. Usamos una función que interpola mediciones reales de 100 K a 1600 K con una desviación media al cuadrado de  $3 \times 10^{-5}$ , y no buscamos más allá de esos valores.

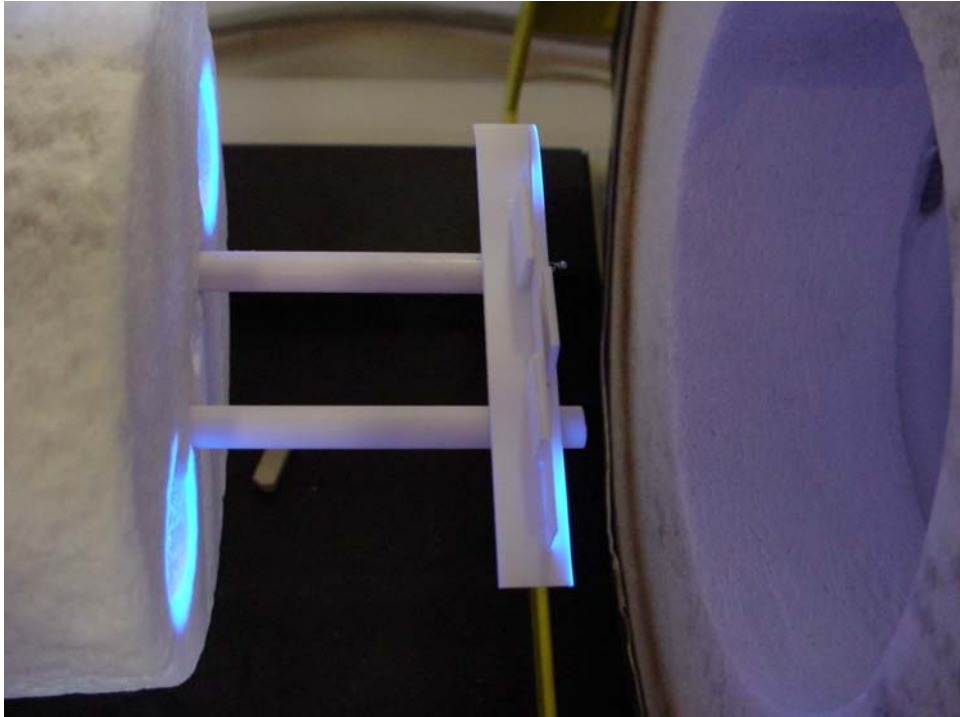
El problema es conocer la densidad del vidrio fundido a la temperatura de cada medición.

A simple vista esto parece, nuevamente, un problema sin solución. Hemos encontrado una solución con una bastante buena aproximación usando los datos del dilatómetro óptico.

Una de las ventajas de medir el comportamiento termo-mecánico de un objeto de vidrio utilizando un dilatómetro sin contacto, es el hecho que se puede obtener una medición aceptable de la expansión del vidrio a lo largo de una vasta gama de temperaturas superior a la temperatura de transición del vidrio ( $T_g$ ). Más allá de la  $T_g$  el vidrio entra en el estado de líquido sobrefundido y luego pasa al estado líquido. El aumento tan alto de la inclinación de la curva después de la  $T_g$  se debe al grado de libertad más elevado de las unidades estructurales, y ésta es en realidad la capacidad de expansión del vidrio fundido. La curva medida con el dilatómetro óptico alcanza el punto de máximo y el comienzo del descenso. Como la medición se lleva a cabo sin contacto con el objeto, no se le aplica ninguna fuerza externa al vidrio. El objeto de vidrio se acorta porque la tensión superficial del vidrio está empujando los bordes del objeto, redondeándolos. El volumen del vidrio está todavía aumentando, pero la longitud de la muestra se está acortando porque está volviéndose redonda.

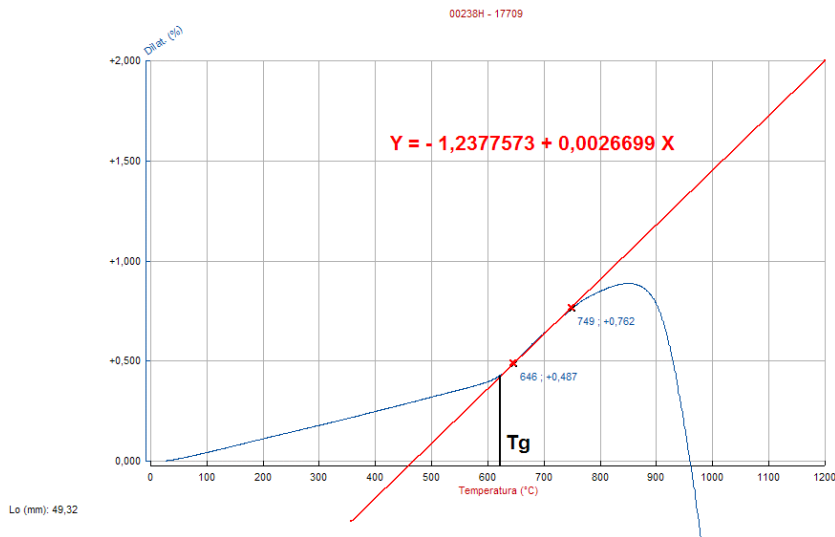


Fig. 4: Muestras de vidrio antes y después de la medición con MISURA LT dilatómetro óptico.



**Fig. 5: El sistema de medición del dilatómetro óptico.**

Para obtener una estima de la densidad a altas temperaturas, derivamos la ecuación de la línea pasando a través de dos puntos en el estrecho segmento de la curva superior a la Tg. Esta línea se extrapola hasta la temperatura deseada para saber el valor del aumento en volumen. Como la masa de la muestra no se carga debido al aumento de temperatura, es entonces posible saber la densidad a la temperatura dada.



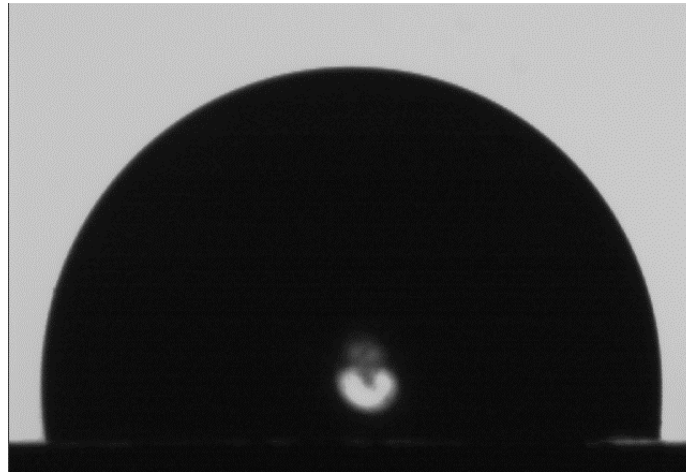
**Fig. 6: Extrapolación de la expansión de un vidrio líquido superando la temperatura de transición.**

En el ejemplo ilustrado, la expansión extrapolada a 1200 °C es de 1,9661 %. La densidad del vidrio a temperatura ambiente era de 2243 Kg/m<sup>3</sup> y después de la densidad extrapolada a 1200 °C será de 2115,73 Kg/m<sup>3</sup>. Por supuesto, si el usuario dispone de una estima mejor de la densidad a la temperatura de la medición, puede ingresar el valor real.

## La medición de la tensión superficial.

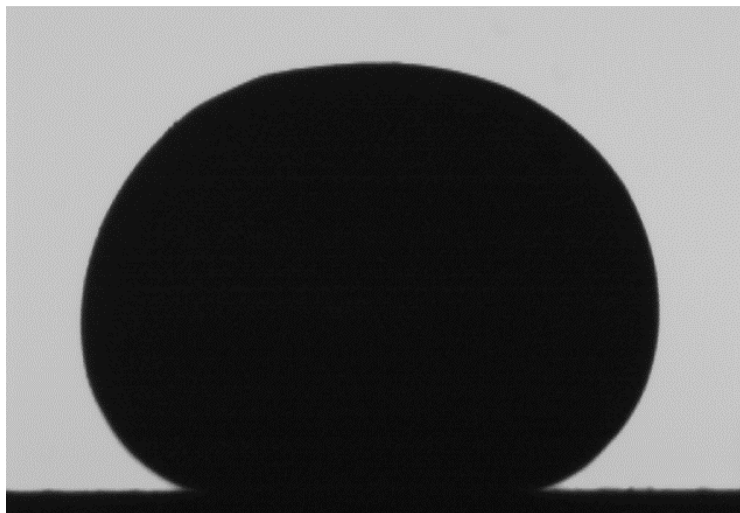
La medición real de la tensión superficial se realiza analizando el perfil de la gota, y el microscopio térmico MISURA 3 es el instrumento ideal para un horno a altas temperaturas.

La primera ilustración es una imagen de una gota de vidrio de cal sodada a 1100 °C sobre una lámina de platino. La gota de vidrio es transparente como el cristal y el foco de luz en el centro se debe al efecto lente del vidrio. La tensión superficial calculada es de  $346 \times 10^{-3}$  N/m, por lo que concuerda con los datos registrados.



**Fig. 7: Imagen de una gota transparente de vidrio de cal sodada fundido a 1100 °C, que se obtiene con el microscopio térmico MISURA3**

El segundo ejemplo es una gota de aleación fundida inoxidable (63% lata, 37% plomo) en una atmósfera de nitrógeno a 200°C. En este caso la tensión superficial calculada es de  $482 \times 10^{-3}$  N/m, la cual, nuevamente coincide con los datos registrados.



**Fig. 8: Imagen de una gota de aleación fundida sobre un plato de aluminio, en una atmósfera de nitrógeno obtenida con el microscopio térmico MISURA 3.**

La medición es bastante fácil y veloz, pero requiere una *buena* gota sésil. Una de las suposiciones de la medición es el hecho que la gota tenga una simetría axial. Si la imagen de la gota se ve asimétrica, no vale la pena seguir con la medición. Es mejor comenzar una nueva prueba desde el principio, prestando la debida atención en usar un objeto de soporte bien limpio y una sustancia de muestra muy bien preparada.

## **Conclusiones**

La disponibilidad de un instrumento nuevo, que facilita y hace posible la medición de la tensión superficial sobre material fundido a altas temperaturas, ofrece a la comunidad científica un nuevo instrumento de investigación. El microscopio térmico es una herramienta de laboratorio muy ruda y no requiere de una gran experiencia para poder utilizarlo. La incorporación de esta característica amplía el campo de utilización de esta vieja técnica de laboratorio.