

Tabla 13 Influencia de la densidad y tensión superficial en la viscosidad correspondiente al softening point (12).

vidrio	ρ	γ	η	$\log_{10} \eta$
silice	2.2	400	3.1×10^7	7.49
soda-lime	2.5	300	4.2×10^7	7.62
alto plomo	6.2	200	1.3×10^8	8.11

Annealing Point (viscosidad 10^{13} poise) representa la temperatura en la cual las deformaciones internas del vidrio son reducidas a un límite comercial aceptable en 15 min. El procedimiento de la ASTM C336-69 indica que una fibra uniforme de vidrio de 0.55 a 0.75 mm de diámetro y 20 in de longitud, sometida a una carga de 1 kg. es llevada a un horno, Fig. 10, el cual es calentado 25°C arriba de una temperatura estimada para el annealing point y después enfriado con una velocidad de $4^\circ\text{C}/\text{min}$. Durante el enfriamiento la velocidad de elongación es experimentalmente determinada como una función de la temperatura y graficadas en papel semi-log como se muestra en la fig. 11. El annealing point es la temperatura donde la velocidad de elongación es:

$$\frac{2.5 \times 10^{-6}}{d^2} \quad (\text{implica una viscosidad de } 10^{13} \text{ poise}) \quad (12)$$

Donde: l = longitud efectiva de la fibra
 d = diámetro de la fibra

Fig. 10 Aparato para la determinación de Annealing y Strain Point (viscosidad $10^{14.5}$ poise), representa la temperatura a la cual esfuerzos internos son reducidos a valores bajos en 4 hrs. Se determina por entrapolación de la línea generada en la determinación de annealing point, fig. 10, donde la velocidad de elongación establecida para el annealing point es multiplicada por - -

Donde: l = longitud efectiva de la fibra (en cm)
 e = velocidad de elongación definida (0.00167 cm/seg ó 1mm/min)

La longitud efectiva de la fibra se determina como sigue (13).

$$l = \frac{S_b(L_s - L_i)}{S_b - S_i}$$

Donde: l = longitud efectiva de la fibra
 L_i = longitud total inicial de la fibra
 d_i = diámetro inicial de la fibra
 L_s = longitud total después de la elongación
 d_s = diámetro después de la elongación

Combinando las ecuaciones (9) y (10), sustituyendo valores y resolviendo para viscosidad se obtiene la siguiente expresión.

$$\eta = 2.18 \times 10^7 \left(\rho - \frac{\gamma}{d} \right) \quad (11)$$

Esta ecuación muestra que la viscosidad correspondiente al "softening point" depende de la densidad y la tensión superficial del vidrio de prueba. Ejemplos de esta dependencia pueden verse en la tabla 13.

Tabla 13 Influencia de la densidad y tensión superficial en la viscosidad correspondiente al softening point (12).

log ₁₀ η	ρ	γ	σ	vidrio
7.49	3.1 x 10 ³	400	2.5	silice
7.62	4.2 x 10 ³	300	2.5	soda-lime
8.11	1.3 x 10 ⁸	200	6.2	alto plomo

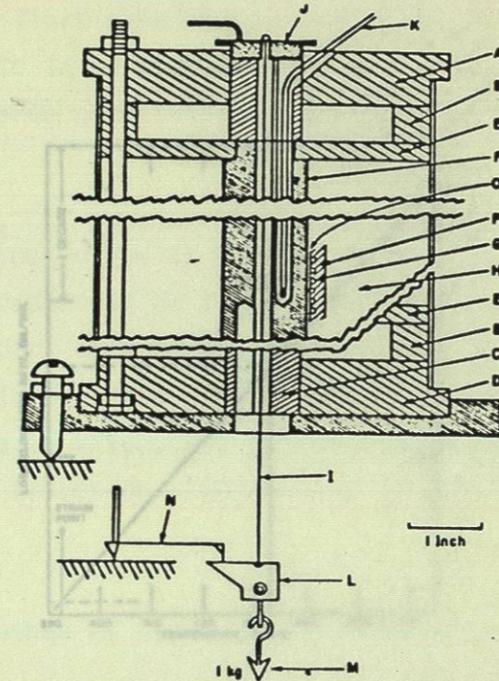
Annealing Point (viscosidad 10¹³ poise) representa la temperatura en la cual las deformaciones internas del vidrio son reducidas a un límite comercial aceptable en 15 min. El procedimiento de la ASTM C38-69 indica que una fibra uniforme de vidrio de 0.25 a 0.75 mm de diámetro y 20 in de longitud, sometida a una carga de 1 kg. es llevada a un horno, Fig. 10, el cual es calentado 25°C arriba de una temperatura estimada para el annealing point y después enfriado con una velocidad de 4°C/min. Durante el enfriamiento la velocidad de elongación es experimentalmente determinada como una función de la temperatura y graficadas en papel semi-log como se muestra en la Fig. 11. El annealing point es la temperatura donde la velocidad de elongación es:

$$\frac{2.2 \times 10^{-6}}{b^2} \quad \text{(implica una viscosidad de } 10^{13} \text{ poise)}$$

(12)

Donde: l = longitud efectiva de la fibra
b = diámetro de la fibra

Strain Point (viscosidad 10^{14.5} poise), representa la temperatura a la cual esfuerzos internos son reducidos a valores bajos en 4 hrs. Se determina por extrapolación de la línea generada en la determinación de annealing point, Fig. 10, donde la velocidad de elongación establecida para el annealing point es multiplicada por



A, B, C, D—Made of asbestos-cement (Transite or equivalent).
E—Welded asbestos-cement (Transite or equivalent) disk.
F—Copper core 1 1/2 in. OD by 1 1/2 in. total length.
G—91 turns No. 22 Nichrome V wire (or equivalent).
H—Distillaceous earth.
I—Sample fiber.
J—Stainless steel support disk.
K—Thermocouple.
L—Lever platform.
M—Load.
N—Optical lever.

Fig. 11 Curva típica de velocidad de elongación vs temperatura para la determinación de annealing y strain point (12).

Fig. 10 Aparato para la determinación de Annealing y Strain point (12).

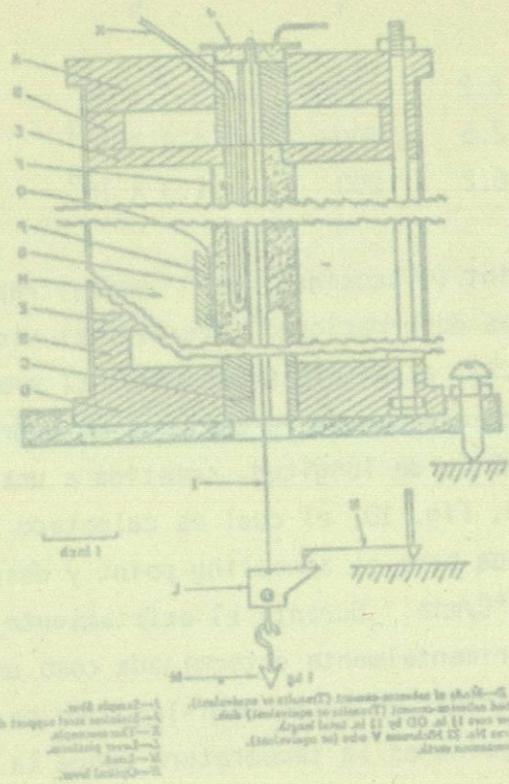
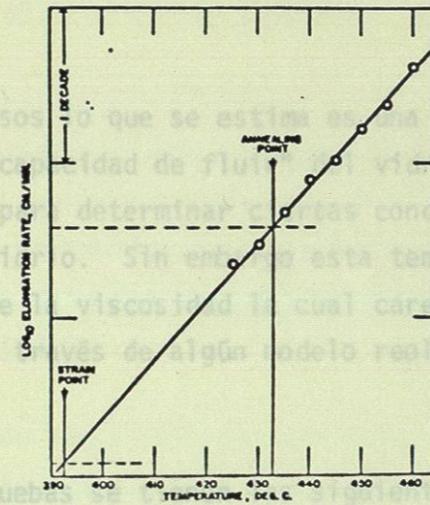


Fig. 10. Aparato para la determinación de Annealing y Strain point (12).

0.0316 y la temperatura que le corresponde determina el Strain Point.

La determinación de estos puntos estándares tiene algunos problemas, primero, la fibra experimenta un gradiente de temperatura, haciéndose necesario la determinación de una "longitud efectiva". Segundo, deben hacerse correcciones por expansión térmica del horno y de la muestra.

En estos casos que se estima que la temperatura que corresponde a cierta "cantidad de flujo" o "viscosidad", lo cual tiene significado práctico para determinar las condiciones de operación en el proceso del vidrio. Sin embargo esta temperatura es solo una medida indirecta de la viscosidad, lo cual carece de sentido cuando se quiere aplicar a más del modelo reológico en las ecuaciones de movimiento.



En estas pruebas se tienen las siguientes implicaciones (14).

1.- Al estirarse un cilindro de vidrio, por su propio peso o bien por la aplicación de una carga constante, el esfuerzo (F/A) no permanece constante dado que no existe compensación al cambio de área.

2.- En ambos casos el tensor de deformación es expresado como una velocidad de elongación y no como un gradiente de velocidad.

Fig. 11 Curva típica de velocidad de elongación Vs temperatura para la determinación de annealing y strain point (12).

3.- No existe un gradiente de velocidad constante, dado que el esfuerzo que se aplica no es constante, lo que imposibilita el empleo de la ecuación (6) y por ende la relación de la ecuación (8).

0.0316 y la temperatura que le corresponde determina el Strain Point.

La determinación de estos puntos estandars tiene algunos problemas, primero, la fibra experimenta un gradiente de temperatura, haciéndose necesario la determinación de una "longitud efectiva". Segundo, deben hacerse correcciones por expansión térmica del horno y de la muestra.

En estos casos lo que se estima es una temperatura que corresponde a cierta "capacidad de fluir" del vidrio, lo cual tiene significado práctico para determinar ciertas condiciones de operación en el proceso del vidrio. Sin embargo esta temperatura es solo una medida indirecta de la viscosidad la cual carece de sentido cuando se quiere aplicar a través de algún modelo reológico en las ecuaciones de movimiento.

En estas pruebas se tienen las siguientes implicaciones (14).

- 1.- Al estirarse un cilindro de vidrio, por su propio peso o bien por la aplicación de una carga constante, el esfuerzo (F/A) no permanece constante dado que no existe compensación al cambio de área.
- 2.- En ambos casos el tensor de deformación es expresado como una velocidad de elongación y no como un gradiente de velocidad.
- 3.- No existe ninguna fundamentación para esperar un gradiente de velocidad constante, dado que el esfuerzo aplicado no es constante, lo que imposibilita el empleo de la ecuación (6) y por ende la relación de la ecuación (8).

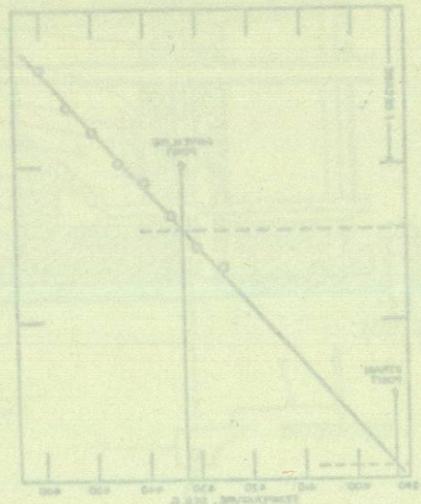


Fig. 11. Curva típica de velocidad de elongación vs temperatura para la determinación de annealing y strain point (12).

0.0316 y la temperatura que le corresponde determina el Strain Point.

La determinación de estos puntos estándares tiene algunos problemas, primero, la fibra experimenta un gradiente de temperatura, haciéndose necesario la determinación de una "longitud efectiva". Segundo, deben hacerse correcciones por expansión térmica del horno y de la muestra.

En estos casos lo que se estima es una temperatura que corresponde a cierta "capacidad de flujo" del vidrio, lo cual tiene significado práctico para determinar ciertas condiciones de operación en el proceso del vidrio. Sin embargo esta temperatura es solo una medida indirecta de la viscosidad la cual carece de sentido cuando se quiere aplicar a través de algún modelo reológico en las ecuaciones de movimiento.

En estas pruebas se tienen las siguientes implicaciones (14).

1.- Al estirarse un cilindro de vidrio, por su propio peso o bien por la aplicación de una carga constante, el esfuerzo (F/A) no permanece constante dado que no existe compensación al cambio de área.

2.- En ambos casos el tensor de deformación se expresa como una velocidad de elongación y no como un gradiente de velocidad.

3.- No existe ninguna fundamentación para esperar un gradiente de velocidad constante, dado que el esfuerzo aplicado no es constante, lo que impide el empleo de la ecuación (8) y por ende la relación de la ecuación (8).

ATERIAL
VEVO

de la ecuación (8) implícita en la ecuación (8) corresponde al factor 1/3 solo es válida para flujos laminares y si bien los gradientes de velocidad son bajos lo cual implica que en estas condiciones casi cualquier material es newtoniano, todavía estaría por demostrarse, en el vidrio para esfuerzos menores de 1kg/cm^2 .

Por lo anterior, no existe una fundamentación sólida para validar las mediciones de la viscosidad del vidrio en este rango de temperatura usando los métodos anteriormente descritos y así poder ser usadas en las ecuaciones de movimiento.

c) viscoelasticidad

Un fluido ideal definido por ecuación (5) establece una respuesta instantánea del esfuerzo al someter el material a un gradiente de velocidad, Por otra parte un sólido ideal se comporta de acuerdo con la Ley de Hooke. Ecuación (4).

Los materiales que tienen un comportamiento intermedio entre sólido ideal y líquido se denomina viscoelásticos.

Elementos Básicos en la Modelación del Comportamiento Viscoelástico

Antes de intentar un modelo para explicar el comportamiento viscoelástico de un material, debemos examinar la respuesta en deformación ϵ de los sistemas ideales a un esfuerzo σ .

Un elemento elástico ideal está representado por un resorte que obedece a la Ley de Hooke. La deformación elástica es instantánea e independiente del tiempo. Fig. 12a. Una respuesta completamente viscosa es la de un fluido newtoniano, cuya deformación es li