

### **NOTA IMPORTANTE:**

La entidad sólo puede hacer uso de esta norma para si misma, por lo que este documento NO puede ser reproducido, ni almacenado, ni transmitido, en forma electrónica, fotocopia, grabación o cualquier otra tecnología, fuera de su propio marco.

**ININ/ Oficina Nacional de Normalización**

---

**NORMA CUBANA**

**NC**

ISO 12644: 2005  
(Publicada por la ISO, 1998)

---

**TECNOLOGÍA GRÁFICA — DETERMINACIÓN DE LAS  
PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS TINTAS EN PASTA  
Y BARNICES, MEDIANTE EL VISCOSÍMETRO DE VARILLA  
(BARRA Y ANILLO)  
(ISO 12644: 1998, IDT)**

Graphic technology—Determination of rheological properties of  
paste inks and vehicles by the falling rod viscometer

---

ICS: 37.100; 87.080

1. Edición      Junio 2005  
REPRODUCCIÓN PROHIBIDA

Oficina Nacional de Normalización Calle E No. 261 Vedado, Ciudad de La Habana.  
Cuba. Teléfono: 830-0835 Fax: (537) 836-8048 Correo electrónico: [nc@ncnorma.cu](mailto:nc@ncnorma.cu)



Cuban National Bureau of Standards

## **Prefacio**

La Oficina Nacional de Normalización (NC), es el Organismo Nacional de Normalización de la República de Cuba que representa al país ante las Organizaciones Internacionales y Regionales de Normalización.

La elaboración de las Normas Cubanas y otros documentos se realiza generalmente a través de los Comités Técnicos de Normalización. Su aprobación es competencia de la Oficina Nacional de Normalización y se basa en las evidencias del consenso.

### **Esta Norma Cubana:**

- Ha sido elaborada por el Comité Técnico de Normalización NC/CTN 86 Tecnología Gráfica, integrado por las siguientes entidades:

Unión Integración Poligráfica	Empresa Gráfica Argraf
Ministerio de la Industria Ligera	Centro de Envases y Embalajes
Oficina Nacional de Normalización	Revista "Mar y Pesca"
Sociedad Grafos de Cubase	Instituto Cubano del Libro. MINICULT
Empresa Editorial Pueblo y Educación	Unión de Empresa del Tabaco. MINAGRI
PUBLICITUR S.A.	Empresa Comercializadora. MINSAP
Empresa GEOCUBA	Empresa Gráfica Ciego de Avila
Empresa Gráfica Alfredo López	Empresa Gráfica UNIL
Empresa Litográfica de la Habana	Empresa Especialidades Gráficas
Instituto de Investigaciones en Normalización.	

- Es una adopción idéntica por el método de traducción del inglés de la Norma Internacional *ISO 12644: 1996 Graphic technology.. Determination of rheological properties of paste inks and vehicles by the falling rod viscometer*

## **© NC, 2005**

**Todos los derechos reservados. A menos que se especifique, ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida o utilizada en alguna forma o por medios electrónicos o mecánicos, incluyendo las fotocopias, fotografías y microfilmes, sin el permiso escrito previo de:**

**Oficina Nacional de Normalización (NC)**

**Calle E No. 261, Vedado, Ciudad de La Habana, Habana 4, Cuba.**

**Impreso en Cuba**

**TECNOLOGÍA GRÁFICA—DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS TINTAS EN PASTA Y BARNICES, MEDIANTE EL VISCOSÍMETRO DE VARILLA (BARRA Y ANILLO)**

## 1 Objeto

Esta Norma Internacional especifica el procedimiento para determinar la viscosidad y la rigidez de las tintas, pastas y barnices que son estables a temperatura ambiente.

Es aplicable a las tintas y barnices con viscosidad aparente desde 2 Pa.s a 200 Pa.s

## 2 Términos y definiciones

Se dan las siguientes definiciones para esta norma.

**2.1 viscosidad:** medida de la fricción interna de un líquido en movimiento. La viscosidad se define generalmente como el cociente del esfuerzo de cizalla (2.2) respecto a la velocidad de cizalla (2.3)

$$\eta = \frac{\sigma}{\gamma} \quad \dots(1)$$

**2.2 esfuerzo de cizalla ( $\delta$ )** fuerza por área en una dirección paralela a la fuerza aplicada. Unidad Pa.

**NOTAS:** Para el viscosímetro de varilla, el esfuerzo de cizalla es proporcional al peso total de la varilla y de las pesas de acuerdo con la ecuación:

$$\sigma = \frac{W}{A} = \frac{mg}{2\pi r l} \quad \dots(2)$$

Donde (verse figura 1 y 2)

$\sigma$  es el esfuerzo de cizalla;

W es el peso total de la varilla y las pesas;

A es la zona de la cizalla aparente;

g es la aceleración de la gravedad;

M es la masa total;

r es el radio de la varilla;

l es la altura de la apertura del anillo;

**NOTA:** La altura de cizalla de la apertura del anillo del viscosímetro de varilla tiene normalmente una sección talada y otra paralela; se entiende por tanto que A no es la zona real de cizalla si no que es la zona de cizalla aparente.

**2.3 velocidad de cizalla,  $\gamma$ :** Gradiente de velocidad a través de un líquido sometido a cizallamiento perpendicularmente a la zona de cizalla Unidad: s<sup>-1</sup>

**NOTA:** Para el viscosímetro de varilla,  $\gamma$  es inversamente proporcional al tiempo de caída según la ecuación:

$$\gamma = \frac{L}{r \ln (R / r) \cdot t} \quad \dots(3)$$

donde:

$\gamma$  es la velocidad de cizalla;  
 L es la distancia de caída de la varilla;  
 r es el radio de la varilla;  
 R es el Radio de la apertura;  
 T es el tiempo de caída.

Si el cociente de los radios de la varilla y la apertura está próximo a uno, se puede simplificar el término a:

$$\gamma = \frac{L}{S \cdot t} \quad \dots(4)$$

donde: S es el espesor de la película de tinta en el espacio determinado por la diferencia entre los radios de la apertura y de la varilla

**2.4 viscosidad aparente,  $\eta_a$ :** Cociente del esfuerzo de cizalla  $\sigma$  respecto a la velocidad de cizalla  $\gamma$  para una fuerza o velocidad de cizalla dados. Unidad: Pa. s

**2.5 líquido Newtoniano:** Líquido cuyo esfuerzo de cizalla es proporcional a la velocidad de cizalla.

**2.6 fluido no Newtoniano:** Líquido cuyo esfuerzo de cizalla no es proporcional a la velocidad de cizalla.

**NOTA 1:** Existen dos tipos de líquidos no Newtonianos. En los líquidos que se espesan por cizalla, la viscosidad aumenta con la velocidad de cizalla; en los líquidos que se fluidifican por cizalla, la viscosidad disminuye con la velocidad de cizalla.

**NOTA 2:** Si la viscosidad de un líquido disminuye, con la aplicación de un esfuerzo mecánico constante, desde un valor en el estado de reposo hasta un valor final y vuelve a aumentar si el esfuerzo cesa, el líquido se llama tixotrópico.

**2.7 curva de flujo:** Gráfica del esfuerzo de cizalla  $\sigma$  en función de la velocidad de cizalla  $\gamma$ , o viceversa.

**2.8 modelo Casson** (véase A.1): Modelo de flujo que asume un aumento no lineal del esfuerzo de cizalla  $\sigma$  al aumentar la velocidad de cizalla  $\gamma$ . Se requiere una fuerza mínima  $\sigma_0$  para iniciar el movimiento.

**2.9 modelo Bingham** (véase A.2): Modelo de flujo que se supone un aumento lineal del esfuerzo de cizalla  $\sigma$  al aumentar la velocidad de cizalla  $\gamma$ . Se necesita una fuerza mínima  $\sigma_0$  para iniciar el movimiento.

**2.10 modelo exponencial Power Law** (véase A.3): Modelo de flujo que asume un aumento del esfuerzo de cizalla  $\sigma$  de un líquido, proporcionalmente a la enésima potencia de la velocidad de cizalla porcentaje del espesor original de la manta o como una disminución absoluta del espesor en milímetros.

**2.11 rigidez,  $\sigma_0$** : Mínima fuerza necesaria para iniciar el movimiento de un líquido. Unidad: Pa.

**2.12 pseudo rigidez,  $\sigma_Y$** : Esfuerzo de cizalla a una baja velocidad de cizalla definida al aplicar el modelo exponencial, normalmente  $2,5 \text{ s}^{-1}$

**2.13 temperatura de referencia:**  $25 \text{ °C}$  Temperatura a la que se expresan todos los resultados: Unidad:  $\text{°C}$

**NOTA:** Las medidas realizadas a temperaturas distintas han de corregirse (véase 6.2.2)

**2.14 temperatura de ensayo:** temperatura de la apertura del anillo durante las mediciones Unidad:  $\text{°C}$

**2.15 índice de estructura (shortness ratio):** cociente entre el valor de la rigidez o pseudo rigidez y la viscosidad aparente Unidad:  $\text{s}^{-1}$

### 3. Método de ensayo

#### 3.1 Principio

El objeto de este ensayo es la medición de la velocidad relativa entre una varilla que cae y un anillo. El extremo de la varilla está insertado en la apertura del anillo. El fluido de ensayar se deposita en la apertura, de manera que sufre cizalla cuando la varilla cae.

#### 3.2 Aparatos

##### 3.2.1 Viscosímetro de barra y anillo

El viscosímetro consta de:

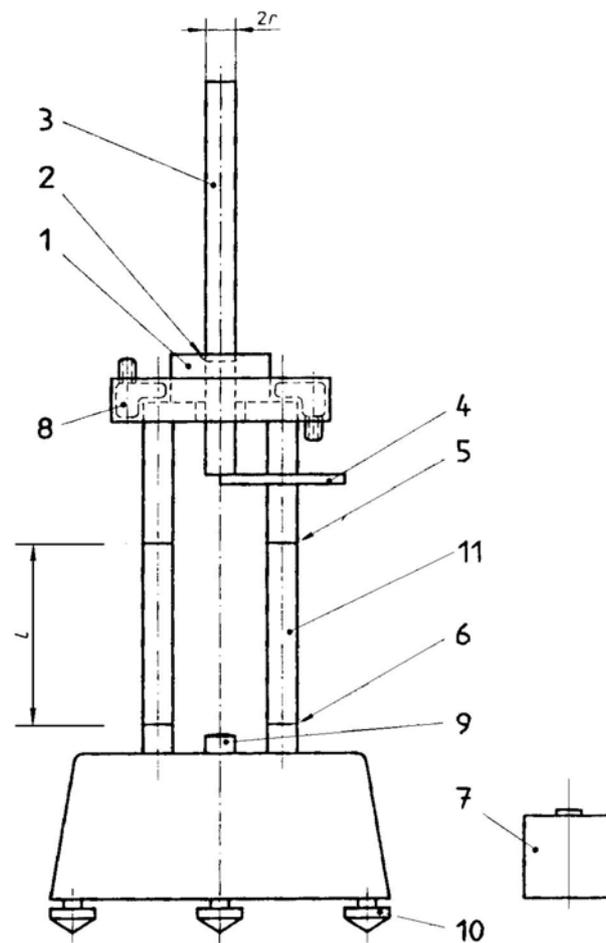
- Una varilla cilíndrica (figura 1) de metal o de cualquier otro material duro. Para obtener valores comparables del esfuerzo y de la velocidad de cizalla, la masa de la varilla debe de ser de  $(132 \pm 1) \text{ g}$
- Un anillo de metal (figura 2) con una apertura cilíndrica o cónica definida. El anillo debe estar fijado sobre un soporte y su temperatura debe ser controlada. Dado el diámetro de la varilla y de la apertura son factores determinantes, se fabrican bajo tolerancias mínimas, facilitadas por el fabricante. Para minimizar posibles diferencias, cada barra debe ser utilizada exclusivamente con su correspondiente anillo.

- Pesas para colocar encima de la varilla. Existen series de pesas que deben usarse según las siguientes combinaciones de masas:

A	5000	4000	3000	2000	1000
B	3000	2000	1500	500	
C	1500	1000	800	500	
D	800	600	400	200	
E	400	300	200	100	
F	200	100	50	0	

La tolerancia de la masa de las pesas debe ser de  $\pm 0,2$  g

- la distancia de medida específica, marcada en las barras de soporte. La tolerancia debe ser de  $\pm 0,2$  mm. Las marcas pueden sustituirse por sensores electrónicos.
- un indicador de nivel
- un cronómetro tolerancia de  $\pm 0,1$  s (deseable  $\pm 0,01$  s)



- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 1.- Anillo                                | 9.- Nivel                          |
| 2.- Apertura                              | 10.- Tornillo de ajuste horizontal |
| 3.- Varilla                               | 11.- Barra de soporte              |
| 4.- Palanca de soporte                    | r.- Radio de la varilla            |
| 5.- Distancia de medición marca superior  | R.- Radio de apertura              |
| 6.- distancia de medición, marca inferior | l.- Longitud de la apertura        |
| 7.- Pesa                                  | L.- Distancia de medición          |
| 8.- Camisa de agua.                       |                                    |

**Figura 1 — Viscosímetro de barra y anillo**

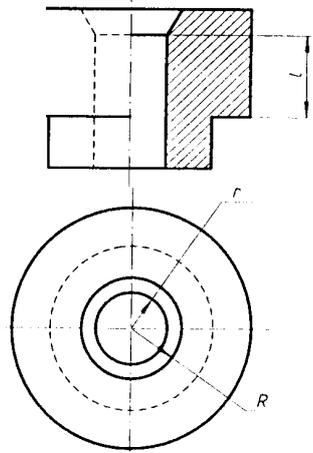


Figura 2 — Anillo de apertura

### 3.2.2 Control de la temperatura

Se debe disponer de medios para la medición y control de la temperatura de ensayo.

### 3.2.3 Otros elementos

Espátulas blandas. Aceites de viscosidad patrón (mínimo 2) para calibración.

**NOTA:** La viscosidad de los aceites de viscosidad patrón será del mismo orden de las muestras a ensayar. La viscosidad de estos aceites deberá estar certificada por un organismo petrológico. Los modelos internos solo pueden usarse para estadios comparativos.

### 3.3 Control de la temperatura ambiental

Los ensayos se deben realizar a una temperatura ambiental controlada. Esto puede conseguirse situando el viscosímetro en una cabina controlada termostáticamente o trabajando a una temperatura ambiental constante.

Si se trabaja en una cabina, la temperatura interna no debería cambiar respecto a la temperatura de ensayo en más de  $\pm 0,5$  °C. Para la temperatura ambiente de la sala se permite una diferencia de  $\pm 2$  °C respecto a la de ensayo. La temperatura estándar de referencia debe ser de  $(25 \pm 0,2)$ °C

### 3.4 Preparación para el ensayo.

Previamente la muestra (aproximadamente 5 g) debe ser homogeneizada con una espátula y acondicionada a la temperatura de ensayo. La muestra debe ser uniforme sin contener partículas gruesas.

Se selecciona el juego de pesas en función de los resultados esperados.

**NOTA:** Con el peso mayor, el tiempo de caída debe estar normalmente entre 4s y 10s. Para las tintas heat-set puede ser conveniente un tiempo de caída menor.

Una cantidad de muestra suficiente para cubrir la varilla y la apertura. Se aplica a la parte inferior de la varilla, distribuyéndose uniformemente la muestra, después se coloca el mayor peso sobre ésta y se realiza una caída libre, suficiente para mojar la varilla y el anillo de apertura. Para iniciar el ensayo, la varilla se inserta en la apertura y descansa en la palanca se soporte.

### 3.5 Proceso de ensayo

El ensayo se realiza con la serie elegida, en orden de pesos descendente. El tiempo de caída no debe exceder de 60 s. Después de cada caída, la varilla se limpia con una espátula y la muestra recogida se aplica de nuevo en la parte inferior de la varilla. Durante el ensayo no se debe reponer la muestra.

Al principio y al final del ensayo debe comprobarse la temperatura de la muestra.

Para muestras altamente tixotrópicas, puede ser necesario hacer previamente una caída de acondicionamiento.

### 3.6 Limpieza

Después del ensayo, el viscosímetro debe ser limpiado inmediatamente con el trapo sin pelusa y un disolvente adecuado.

## 4 Calibración

El viscosímetro debe estar instalado sobre un soporte firme, al resguardo de corrientes de aire. Ajustar el indicador de nivel para obtener una alimentación vertical adecuada. El cronómetro y la distancia entre los sensores se calibran durante la instalación inicial. El cronómetro debe recalibrarse regularmente.

La calibración debe realizarse con los aceites patrones de viscosidad, según el procedimiento descrito en 3.5

### 4.1 Calibración por los modelos Casson y Bingham (véase A.1 y A.2)

Suponiendo que los aceites patrones de viscosidad son líquidos estrictamente Newtonianos, el cálculo es el siguiente:

A partir de (1), (2) y (4), se obtiene:

$$\eta = \frac{\sigma}{\gamma} = \frac{mg}{2 \pi r l} \times \frac{st}{L} \quad \dots(5)$$

donde:

- $\gamma$  es la velocidad de cizalla;
- $\sigma$  es el esfuerzo de cizalla;
- $\gamma$  es la velocidad de cizalla;
- m es la masa;
- g es la aceleración de la gravedad;
- r es el radio de la varilla;
- l es la altura de la apertura del anillo;
- S es el espesor de la película de tinta entre barra y anillo;
- t es el tiempo de caída;
- L es la distancia de medición;

Los parámetros fijos y las constantes se cambian en los factores  $\alpha$  y  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{L}{s} \quad \dots(6)$$

y

$$\beta = \frac{g}{2 \pi r l} \quad \dots(7)$$

La unidad de  $\alpha$  es 1 y la de  $\beta$  es Pa/Kg  
 Puesto que la velocidad de cizalla

$$\gamma = \frac{\alpha}{t} \quad \dots(8)$$

y el esfuerzo de cizalla

$$\sigma = \beta m \quad \dots(9)$$

la velocidad de un fluido Newtoniano puede calcularse a partir de la pendiente de una gráfica de  $\gamma$  respecto a  $\sigma$  para diferentes masas. La viscosidad medida en la pendiente recíproca de la línea de regresión lineal.

Si un determinado juego de varilla y anillo muestra variaciones  $> 20\%$  de las especificaciones de la viscosidad del aceite patrón, debe ser descartado. Diferencias menores pueden ser compensadas usando un factor de corrección  $\emptyset$ .

$$\emptyset = \eta \text{ verdadero} / \eta \text{ medido} \quad \dots(10)$$

El factor de corrección  $\emptyset$  es específico para cada juego de barra y anillo. Se recomienda tener un juego calibrado como patrón interno.

## 4.2 Calibración para el modelo Power Law

Para determinar el factor  $\beta$  (constante de esfuerzo) definido en la ecuación (7), es necesario medir el radio  $r$  de la barra y la altura  $l$  de la apertura. Ambas dimensiones deben medirse con una tolerancia de  $\pm 0,01$  mm. Con estos datos, el factor  $\beta$  se calcula según la ecuación (7).

El valor del factor  $\alpha$  definido en la ecuación (6) debe calcularse a partir de los diferentes tipos de caída de los aceites patrones de viscosidad. Para esto, deben hacerse mediciones con al menos dos aceites, cubriendo el rango deseable de viscosidad, y al menos cuatro tiempos de caída. La viscosidad conocida de los aceites se divide por el tiempo de caída  $t$  de cada pesa con masa  $m$  y este cociente se representa gráficamente respecto a la masa para cada aceite patrón de viscosidad. Según la ecuación (11), la pendiente de la línea de regresión es el cociente de  $\beta/\alpha$  de los dos factores

$$\frac{\eta_{\text{std}}}{t} = \frac{\beta}{\alpha} m \quad \dots (11)$$

donde:

$\eta_{\text{std}}$  es la viscosidad del aceite patrón;

$t$  es el tiempo de caída;

$m$  es la masa de la pesa;

Habiendo calculado  $\beta$  a partir de las dimensiones geométricas de la barra y la apertura según el método,  $\alpha$  puede calcularse fácilmente. Con los factores  $\beta$  y  $\alpha$  determinados, los valores de la velocidad de cizalla  $\gamma$  y el esfuerzo de cizalla  $\sigma$  puede calcularse a partir del tiempo de caída  $t$  y la masa  $m$ , tal como se muestra en las ecuaciones (8) y (9).

## 5. Cálculos

### 5.1 Cálculos para los modelos Casson y Bingham (véase A.1 y A.2)

El cálculo para estos modelos requiere:

- al menos 4 ensayos de caída en función de las caras de diferentes pesas;
- los factores  $\alpha$  y  $\beta$ ;
- el factor  $\emptyset$ ;
- la temperatura al principio y al final del ensayo;

Las ecuaciones (8) y (9) junto con los factores  $\alpha$  y  $\beta$  se usan para calcular los valores de  $\gamma$  y  $\sigma$ . Para el modelo Casson, la regresión lineal de  $\sqrt{\gamma}$  en función de  $\sqrt{\sigma}$ . Conduce a  $\eta$  y tal como se describe en A.1. Para el modelo Bingham la regresión lineal de  $\gamma$  en función de  $\sigma$  conduce a  $\eta$ ; tal como se describe en A.2.

Para asegurar la repetitividad del ensayo debe calcularse el coeficiente de correlación. Si dicho coeficiente es de 0.999 o superior, los resultados son fiables. En caso contrario debe repetirse el ensayo.

## 5.2 Cálculo para el modelo Power Law (véase A.3)

El cálculo para este modelo requiere:

- al menos 4 ensayos de caída en función de las cargas de diferentes pesas;
- los factores  $\alpha$  y  $\beta$ ;
- la misma temperatura al principio y al final del ensayo;

Las ecuaciones (8) y (9) se usan, junto con los factores  $\alpha$  y  $\beta$ , para calcular los valores  $\gamma$  y  $\sigma$ . La determinación de  $k$  y  $N$  se realizan gráficamente mediante una regresión lineal logarítmica, según se indica en la ecuación (18) en A.3. Estos valores se usan con la ecuación (18) en A.3 para calcular la viscosidad aparente ( $\eta_{2500}$ ), la pseudo rigidez ( $\sigma_{2.5}$ ) y, opcionalmente, el índice de estructura. Los resultados se consideran fiables si el coeficiente de correlación es de 0,999 o superior. Pueden aplicarse correcciones en función de la temperatura, tal como se describe en 6.2.

## 6 Correcciones

### 6.1 Correcciones para los modelos Casson y Bingham

#### 6.1.1 Correcciones de viscosidad.

Según el procedimiento de calibración, la viscosidad se corrige mediante

$$\eta = \eta_{\text{medida}} \delta \quad \dots(12)$$

(véase 4.1)

#### 6.1.2 Correcciones para la temperatura.

La viscosidad es muy dependiente de la temperatura. Por tanto la temperatura debe comprobarse antes y después del ensayo. La temperatura del ensayo se define como la media aritmética de estos valores.

Si la temperatura del ensayo difiere de la temperatura de referencia (25°C) en más de 0,2 °C, debe reajustarse el equipo termostático antes de iniciar el ensayo. El ensayo debe repetirse si en su transcurso la temperatura varía más de 1°C. Si la variación es inferior, se utiliza la siguiente ecuación para corregir el tiempo de caída a la temperatura de referencia (25°C):

$$T = t_{\text{medido}} [1 + \delta (v - 25)] \quad \dots(13)$$

Donde:

$t$  – tiempo de caída;

$v$  – es la temperatura de ensayo en °C;

$\delta$  – es proporcional al gradiente de viscosidad con la temperatura;

Para las tintas de imprimir se puede asumir un valor de  $\delta = 0.1^{\circ}\text{C}^{-1}$  si no hay disponibles datos más precisos.

## 6.2 Correcciones para el modelo Power Law

### 6.2.1 Correcciones de viscosidad. Según apartado 6.1.1

**6.2.2 Correcciones para la temperatura.** La viscosidad es muy dependiente de la temperatura. Por tanto, la temperatura debe comprobarse antes y después del ensayo. La temperatura de ensayo se define como la media aritmética de estos valores.

Si la temperatura del ensayo difiere de la temperatura de referencia (25°C) en más de 0,2°C, debe reajustarse el equipo termostático antes de iniciar el ensayo. El ensayo debe repetirse si en su transcurso la temperatura varía en más de 1°C. Si la variación es inferior, se utiliza la siguiente ecuación para corregir el tiempo de caída a la temperatura de referencia (25°C):

$$\eta = \eta_{(calculada)} [1 + \delta (v - 25)] \quad \dots (14)$$

donde:

$\eta$  es la viscosidad;

$v$  es la temperatura de ensayo en °C;

$\delta$  es proporcional al gradiente de viscosidad con la temperatura;

Para las tintas de imprimir se puede asumir un valor de  $\delta = 0.1^\circ\text{C}^{-1}$  si no hay disponibles datos más precisos. Puede utilizarse la misma ecuación para corregir la pseudo rigidez, pero con  $\delta = 0.05^\circ\text{C}^{-1}$ .

## 7 Informe del ensayo

En el informe correspondiente al ensayo se deberá especificar:

- expresión de la viscosidad referida a la temperatura a 25°C descripción de la muestra;
- temperatura del ensayo (si difiere de 25°C)
- modelo de flujo usado para el cálculo;
- modelo de viscosímetro;
- material de la varilla (si no es de acero);
- cualquier desviación respecto a esta norma;
- fecha del ensayo;
- operador.

## ANEXO A (normativo)

### Modelo de flujo

Todos los modelos mencionados en este anexo son adecuados para la descripción del comportamiento reológico de las tintas.

La selección de un modelo específico se determina por la experiencia práctica.

Los valores de cada uno de los parámetros reológicos dependen del modelo de flujo seleccionado.

No existen ecuaciones para correlacionar los resultados de distintos modelos.

Existen tres modelos principales para describir el comportamiento reológico de las tintas en pastas y barnices (A.1 o A.3).

#### A.1 Modelo Casson

Este modelo supone:

- un aumento no lineal de la velocidad de cizalla  $\gamma$  con un esfuerzo de cizalla  $\delta$  creciente;
- un esfuerzo mínimo necesario para iniciar el flujo.

Este modelo se denomina flujo plástico no lineal y se expresa con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{(\sqrt{\sigma} - \sqrt{\sigma_0})^2}{\gamma} \quad \dots(15)$$

donde:

$\eta$  es la viscosidad;

$\gamma$  velocidad de cizalla;

$\sigma$  es el esfuerzo de cizalla;

$\sigma_0$  es el esfuerzo mínimo (rigidez).

En la práctica,  $\sigma_0$  se obtiene gráficamente mediante el valor obtenido en la intersección ( $\sqrt{\sigma_0}$ ) con el eje de abscisas de la recta de regresión lineal de los valores de  $\sqrt{\gamma}$  respecto a  $\sqrt{\sigma}$  (véase la figura A.1) la pendiente de esta línea es  $\sqrt{1/\eta}$

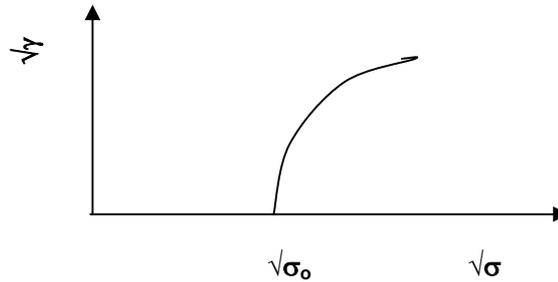


Figura A.1 — Modelo Casson

### A.2 Modelo Bingham

El modelo Bingham supone:

- un aumento lineal de la velocidad de cizalla  $\dot{\gamma}$  con un esfuerzo de cizalla  $\delta$  creciente;
- un esfuerzo mínimo necesario para iniciar el flujo.

Se denomina flujo plástico ideal  $\dot{\gamma}$  se explica con la ecuación siguiente:

$$\eta = \frac{\sigma - \sigma_0}{\dot{\gamma}} \quad \dots (16)$$

donde:

$\dot{\gamma}$  velocidad de cizalla;

$\sigma_0$  es el esfuerzo mínimo (rigidez).

$\eta$  es la viscosidad;

En la práctica,  $\sigma_0$  se obtiene gráficamente mediante el valor obtenido en la intersección ( $\sqrt{\sigma_0}$ ) con el eje de abscisas de la recta de regresión lineal de los valores de  $\dot{\gamma}$  respecto a  $\sigma$  (véase la figura A.2) la pendiente de esta línea es  $1/\eta$

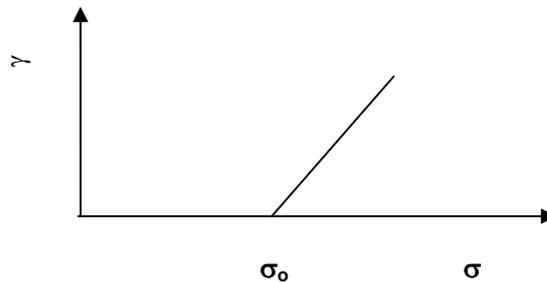


Figura A.2 —Modelo Bingham

### A.2 Modelo Power Law

El modelo Power Law supone que el esfuerzo de cizalla  $\sigma$  de un líquido varía con la velocidad de cizalla  $\gamma$  de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$\sigma = k \gamma^N \quad \dots(17)$$

donde:

K es una constante relativa a la viscosidad del líquido;

N es una constante que describe la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla.

Existen tres grados posibles de N con los siguientes significados:

$N < 1$  líquido que se fluidifica con el cizallamiento;

$N = 1$  líquido Newtoniano;

$N > 1$  líquido que se espesa con el cizallamiento,

En la práctica, la relación lineal se obtiene gráficamente para la representación del logaritmo del esfuerzo de cizalla respecto al logaritmo de la velocidad de cizalla.

$$\log \sigma = \log k + N \log \gamma \quad \dots(18)$$

Los valores de N y K se obtienen gráficamente a partir de la anterior recta de regresión lineal, donde la intersección con el eje de ordenadas es  $\log k$  y la pendiente es N (véase la figura A.3 )

con la ecuación (17) y/o (18), pueden obtenerse los valores de  $\sigma_0$  cualquier velocidad de cizalla.

El informe deberá obtener la siguiente información:

- viscosidad aparente a  $2500 \text{ S}^{-1}$ ;
- el valor de N como grado de fluido no Newtoniano;
- el esfuerzo de pseudo rigidez a  $2,5 \text{ S}^{-1}$  (opcional);
- índice de estructura (opcional).

figura A.2) la pendiente de esta línea es  $1/\eta$

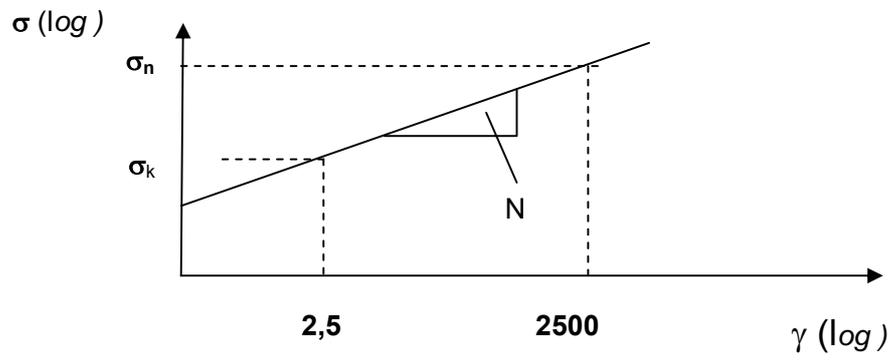


Figura A.3 — Modelo Power Law