

MODELO GENERALIZADO DE RABINOWITSCH

Alejandro Fontalvo, Alfredo
Sánchez y César García.

RESUMEN

Se presenta un modelo generalizado que combina las variaciones de temperatura media del fluido, temperatura del fluido a la pared asociado a cambios de caudales y gradientes de presiones, bajo la condición térmica de flujo de calor constante desde la pared de una geometría tubular. A nivel experimental se ensayaron con soluciones: polímero-agua, bentonita-agua, crudo pesado-kerosene y crudo pesado-aceites lubricantes. Se presentan comparaciones entre el modelo clásico de Rabinowitsch y el modelo generalizado en las determinaciones de la naturaleza viscosa y ecuaciones constitutivas de cada fluido en base a los modelos de potencia y de Ellis.

ABSTRACT

This paper summarizes the results of a generalized model of the Mooney-Rabinowitsch equation, taking into account the effects of the mixing cup temperature and the wall temperature associated with changes of volume flow rates and pressure gradients, under the thermal condition of a constant wall heat flux to pipe flow. Experimental data were obtained for laminar forced flow in the thermal entry region of an uniformly heated pipe with fluids exhibiting a range of non-newtonian behavior: polymer-water, bentonite-water, heavy crude-kerosene and heavy crude-lubricants oils. The results were compared between the classic Mooney-Rabinowitsch equation and the generalized model on determining the viscous nature and constitutive equations of the different fluids analyzed.

INTRODUCCION

La mayoría de los fluidos no-newtonianos son generalmente procesados en régimen laminar bajo la condición térmica de temperatura a la pared constante, sin embargo más energía puede ser cedida (o recibida) por el fluido por unidad de área bajo la condición térmica de flujo de calor constante desde la pared. Para fluidos no-newtonianos, la transferencia de calor es controlada por la tasa de deformación a la pared y el esfuerzo cortante a la pared es función de la variación con temperatura de las propiedades reológicas del fluido (1).

Para la predicción de la naturaleza viscosa de fluidos bajo condiciones isotérmicas, flujo unidi-

mensional, régimen estacionario y fluido incompresible, suelen usarse los métodos Capilar, Couette y Cono-Plato (2) en combinación con información mínima de laboratorio como caídas de presión-caudales, velocidades angulares-torques.

Bajo las aproximaciones anteriores, el perfil de velocidad completamente desarrollado para un fluido representado por el modelo de Oswald de Waele, a través de una tubería de radio R está dado por

$$\frac{V_z(r)}{V_z(o)} = \left| 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right|^{1 + \frac{1}{n}} \dots \dots \dots (1)$$

Si $n > 1$, el fluido presenta un comportamiento dilatante y el perfil varía desde parabólico ($n = 1$) hasta lineal ($n \rightarrow \infty$); si $n < 1$, el fluido presenta un comportamiento pseudo plástico y el perfil varía desde parabólico ($n = 1$) hasta flujo tipo pistón ($n = -1$).

La incorporación de la dependencia de temperatura sobre las ecuaciones constitutivas en estudios de transferencia de calor para fluidos no-newtonianos ha sido completamente ignorada, sólo existen aproximaciones empíricas para correcciones de propiedades reológicas a la pared y en el seno del fluido. Los modelos isotérmicos son incluidos dentro del efecto de disipación viscosa para la predicción de coeficientes de transferencia de calor. Por ejemplo, Bird (3) obtuvo la siguiente relación asintótica en la zona de entrada térmica usando el modelo de Oswald de Waele,

$$Nu_{\infty} = 1.411 \left(\frac{3n + 1}{4n}\right)^{1/3} Gz_x^{1/3} \dots \dots \dots (2)$$

De igual manera pueden citarse los trabajos de: Mitsuishi-Mayatake (4), quienes utilizaron el modelo de Ellis con los parámetros reológicos independientes de temperaturas; Michiyoshi (5) utilizó el modelo plástico de Bingham; Schenk-Van Laar (6) utilizó el modelo de Prandtl-Eyring.

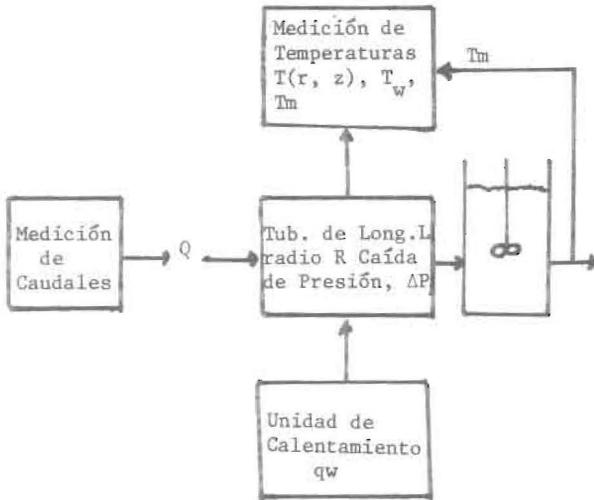
En un intento por incluir la dependencia de temperatura, Cochrane (7) define el modelo de potencia de la siguiente manera:

$$\tau_{rz} = m e^{n \Delta H/RT} \left(-\frac{dV_z}{dr}\right)^n \dots \dots \dots (3)$$

donde ΔH es la energía de activación de flujo, R constante universal de los gases. En este trabajo se presenta el modelo generalizado de Rabinowitsch que permite la incorporación de los efectos térmicos sobre las propiedades reológicas; el modelo es derivado para un perfil de velocidad y temperatura completamente desarrollados, la determinación de la tasa de deformación a la pared resulta función de la temperatura media del fluido, temperatura a la pared y del esfuerzo cortante a la pared.

FUNDAMENTOS TEORICOS

Considerando un fluido no-newtoniano a través de una geometría cilíndrica bajo la condición térmica de flujo de calor constante desde la pared y mediciones simultáneas de temperaturas, presiones y caudales, esquemáticamente



Temperatura media del fluido T_m , representa la energía térmica media del fluido, físicamente implica un mezclado completo de la masa del fluido, por definición:

$$V_z \pi R^2 C_{p,T} T_m(z) = \int_A V_z(r) \rho C_{p,T} T(r,z) dA \dots (4)$$

asumiendo que las propiedades físicas densidad (ρ) y capacidad calorífica a presión constante ($C_{p,T}$) son valores promedios en el rango de temperatura, resulta

$$R^2 V_z T_m(z) = 2 \int_0^R V_z T(r,z) r dr \dots (5)$$

donde V_z es la velocidad promedio en la dirección axial, V_z el perfil de velocidad completamente desarrollado, $T(r,z)$ distribución de temperatura a cualquier posición radial y axial, integrando por partes la Ec. (5):

$$u \rightarrow V_z T, \quad du = \frac{\partial}{\partial r} (V_z T) dr$$

$$dw + 2r dr, \quad w = r^2$$

$$R^2 V_z T_m(z) = r^2 V_z T \Big|_0^R - \int_0^R r^2 \frac{\partial}{\partial r} (V_z T) dr \dots (5')$$

Considerando que a la pared $r = R$ no hay deslizamiento $V_z = 0$, la Ec. (5') se transforma en:

$$R^2 V_z T_m(z) = - \int_0^R r^2 \frac{\partial}{\partial r} (V_z T) dr \dots (6)$$

De la Ec. de Movimiento Lineal o Ec. de Cauchy para flujo unidimensional, régimen estacionario, fluido incompresible y puramente viscoso, resulta

$$\tau_{rz} = \tau_w \frac{r}{R}, \quad \tau_w = \frac{\Delta P}{l} \frac{R}{2} \dots (7)$$

Sustituyendo la relación de τ_{rz} (Ec. 7) en la Ec. (6) y caudal $Q = \pi R^2 V_z$, se obtiene

$$\frac{Q \tau_w^3 T_m}{\pi R^3} = - \int_0^{\tau_w} \tau_{rz}^2 (V_z \frac{\partial T}{\partial r} + T \frac{\partial V_z}{\partial r}) d\tau_{rz} \dots (8)$$

derivando la Ec. (8) respecto a τ_w :

$$\frac{1}{\pi R^3} (3Q \tau_w^2 T_m + Q \tau_w^3 \frac{dT_m}{d\tau_w} + \tau_w^3 T_m \frac{dQ}{d\tau_w}) = - \left[\tau_{rz}^2 (V_z \frac{\partial T}{\partial r} + T \frac{\partial V_z}{\partial r}) \right]_{0,0}^{\tau_w,R}$$

simplificando resulta:

$$\left(- \frac{dV_z}{dr}\right)_{r=R} = \frac{1}{\pi R^3} (3Q \frac{T_m}{T_w} + \frac{\tau_w Q}{T_w} \frac{dT_m}{d\tau_w} + \frac{\tau_w T_m}{T_w} \frac{dQ}{d\tau_w}) \dots (9)$$

La Ec. (9) representa la expresión generalizada del modelo de Rabinowitsch, para el caso especial de condición isotérmica $T_m = T_w = \text{constante}$, $dT_m/d\tau_w = 0$, la Ec. (9) se transforma en la expresión clásica de Mooney-Rabinowitsch:

$$\left(- \frac{dV_z}{dr}\right)_{r=R} = \frac{1}{\pi R^3} (3Q + \tau_w \frac{dQ}{d\tau_w}) \dots (10)$$

La información de laboratorio proporciona los con-

juntos de valores: Caudal (Q), Temperatura a la pared (T_w), Temperatura media del fluido (T_m) y Esfuerzo cortante a la pared (τ_w). Para la determinación de la tasa de deformación a la pared ($-dV_z/dr$) $r=R$ se recomienda expresar Q como función de τ_w y T_m como función de τ_w usando fórmulas de interpolación de Newton de la forma:

$$f = f_0 + (\tau - \tau_0) \delta(\tau_1, \tau_0) + (\tau - \tau_0)(\tau - \tau_1) \delta(\tau_2, \tau_1, \tau_0) + (\tau - \tau_0)(\tau - \tau_1)(\tau - \tau_2) \delta(\tau_3, \tau_2, \tau_1, \tau_0) + \dots \quad (11)$$

Dependiendo del rango del esfuerzo cortante a la pared (τ_w) y de la relación funcional en el diagrama logarítmico viscosidad aparente-esfuerzo cortante, la naturaleza viscosa puede representarse por los modelos de Oswald-de Waele y de Ellis.

$$\tau_w = m \left| \left(-\frac{dV_z}{dr} \right)_{r=R} \right|^n \quad \dots \quad (12)$$

$$\tau_w = \frac{1}{A + B \tau_w^{\alpha-1}} \left| \left(-\frac{dV_z}{dr} \right)_{r=R} \right| \quad \dots \quad (13)$$

En el presente trabajo se comparan resultados para

el modelo generalizado (Ec. 9) y el modelo isotérmico (Ec. 10) a través de un programa de computación basado en el esquema de diferencias divididas para las fórmulas de interpolación de Newton.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Se utilizaron los siguientes fluidos: soluciones de bentonita-agua en las composiciones porcentuales de 4%, 6% y 8% (p/v); soluciones de polímero WSRN-3000-agua en las concentraciones de 2000 ppm y 4000 ppm; soluciones de crudo Boscán-gas oil en las relaciones volumétricas de 1:1 y 2:1 respectivamente; soluciones de la mezcla crudo-gas oil (1:1) con kerosene en las relaciones volumétricas de 3:1 y 3:2 respectivamente; y aceite diesel lubricante N° 40.

La variación de caudales se logró por control de la válvula de paso a 4 posiciones (completamente abierta, 3/4, 1/2 y 1/4) y la válvula de seguridad para reciclo del fluido al tanque de alimentación. Se realizaron pruebas para cada solución a temperatura ambiental (80-86°F, variación de la temperatura del Laboratorio) y con control de calentamiento sobre un reóstato variable para tres salidas de voltajes 70, 90 y 110 voltios. Para las mediciones del perfil axial de presiones, se colocaron tres manómetros previamente calibrados de rango 0-30

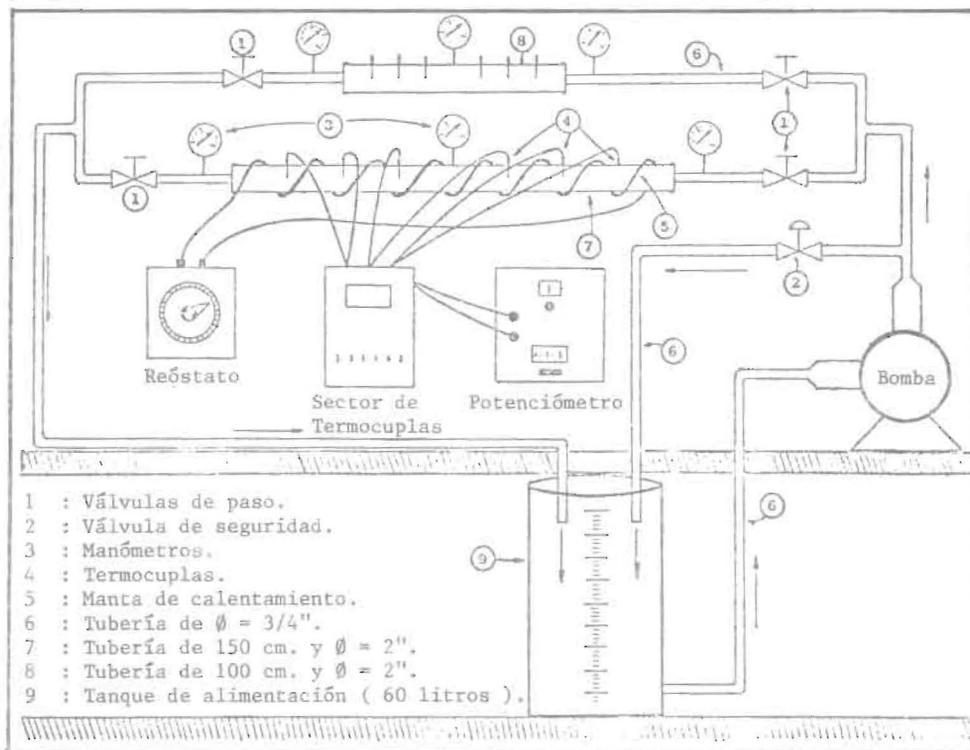


Fig. No.1 Diagrama Esquemático del Equipo Experimental.

psig a la entrada, salida y centro de la tubería de transferencia de calor, mostrada en la Figura N° 1 (8). Para las mediciones del perfil axial y radial de temperatura, de las diferentes soluciones a través de la tubería de 2" de diámetro, se ubicaron seis termopares dispuestos equidistantemente a ambos extremos del manómetro central, conectados a un Selector (marca Honeywell) en serie con un potenciómetro para la lectura a cada posición; los termopares eran colocados simultáneamente a diferentes posiciones radiales: en el centro $r = 0$, en la pared $r = R$ y en la posición media entre el centro pared $r = 1/2 R$. Todas las soluciones utilizadas eran sometidas a un mezclado previo hasta alcanzar cierto grado de homogeneidad con la ayuda de un agitador electro-mecánico de marca Calgon y con capacidad para 55 galones; para la preparación de las soluciones de polímeros se necesitaron 12 horas de continua agitación.

El procedimiento experimental puede resumirse así: i) fijar el nivel de calentamiento de la tubería, seleccionando el voltaje de salida, hasta alcanzar las condiciones estacionarias; ii) variar el caudal, estrangulando el flujo por cierre de la válvula de paso hasta 4 posiciones diferentes; iii) a cada posición de la válvula de paso, efectuar las mediciones de presiones, temperaturas y caudal; iv) fijar de nuevo el nivel de calentamiento y repetir los pasos ii) y iii).

Se utilizaron volúmenes de solución entre 30 - 50 litros, el tanque de alimentación provisto de indicador de nivel tiene capacidad para 60 litros, se usó una bomba de desplazamiento positivo modelo L32 marca Viking de 3 hp de potencia. La determinación del caudal se realizó como la variación del volumen entre el tiempo de desplazamiento $Q = \Delta V / \tau$, la caída de presión se calculó así $\Delta P = P_1 - 0.50 (P_2 + P_3)$, donde P_1 es la presión a la entrada, P_2 presión en el centro y P_3 presión a la salida.

DISCUSION DE RESULTADOS

La Figura No. 2 muestra la relación funcional entre el esfuerzo cortante a la pared y la tasa de deformación a la pared para la mezcla Polímero WSRN 3000 - Agua de concentración 2000 ppm a tres niveles de calentamiento equivalentes a 70, 90 y 110 voltios, mientras la Figura No. 3 muestra la dependencia entre la viscosidad aparente y el esfuerzo cortante a la pared para las mismas condiciones. El comportamiento viscoso para esta muestra indica una naturaleza pseudoplástica a bajas temperaturas y dilatante con incremento de temperatura. La característica general del fluido dilatante es el aumento de la viscosidad aparente con incremento del esfuerzo cortante a la pared y con disminución de temperatura. El modelo isotérmico (Figura señalada con la letra A) y el modelo generalizado de Rabinowitsch (Figura señalada con la letra A') muestran la misma tendencia funcional, los valores de las tasas de deformación $-(dv_z/dz)_{r=R}$ resultan inferiores para

el modelo isotérmico referido a un mismo valor del esfuerzo cortante, pero la diferencia se reduce

con aumento de temperatura. Para las posiciones de calentamiento a 90 y 110 voltios las ecuaciones constitutivas dadas por el Modelo de Potencia resultaron:

a) Para 90 voltios

$$i) \text{ Modelo Isotérmico } \tau_{rz} = 0.109059 \left(-\frac{dv_z}{dr} \right)^{1.4313}$$

para $T_m = 112.94^\circ\text{F}$.

$$ii) \text{ Modelo Generalizado } \tau_{rz} = 0.0372 \left(-\frac{dv_z}{dr} \right)^{2.261}$$

para $112.46 \leq T_m \leq 113.42^\circ\text{F}$

b) Para 110 voltios

$$i) \text{ Modelo Isotérmico } \tau_{rz} = 0.0030 \left(-\frac{dv_z}{dr} \right)^{4.2946}$$

para $T_m = 124.21^\circ\text{F}$.

$$ii) \text{ Modelo Generalizado } \tau_{rz} = 0.00227 \left(-\frac{dv_z}{dr} \right)^{4.41288}$$

para $123.50 \leq T_m \leq 124.92^\circ\text{F}$

El uso del modelo clásico de Rabinowitsch para temperaturas diferentes a la ambiental y sin la inclusión de los efectos de la transferencia de calor entre la pared y la masa de fluido, puede conducir a errores cuyas magnitudes dependen del rango de las tasas de deformación, por ejemplo a 90 voltios, la expresión del error absoluto es:

$$\frac{\tau - \tau_{150}}{\tau} = \left[1 - 2.93 \left(-\frac{dv_z}{dr} \right)^{-0.8297} \right] 100$$

Para bajas tasas de deformación el error resulta menor, así para

$$\left(-\frac{dv_z}{dr} \right) = 120 \text{ seg}^{-1} \text{ el error es } 94.48\%$$

$$\text{mientras para } \left(-\frac{dv_z}{dr} \right) = 5 \text{ seg}^{-1} \text{ el error es } 22.92\%.$$

El modelo generalizado de Rabinowitsch permite de manera fácil, la evaluación de la energía de activación de flujo por Cochrane (7) como una propiedad de transporte para cada fluido viscoso y como un parámetro de corrección para el modelo isotérmico, definido así:

$$\frac{\tau_{\text{Generalizado}}}{\tau_{\text{Isotérmico}}} = \exp \left(\frac{\eta \Delta H}{RT_m} \right) \dots \dots \dots (14)$$

aplicada para el calentamiento a 90 voltios, resulta:

$$\frac{\eta \Delta H}{RT_m} = \ln \left[0.3411 \left(-\frac{dv_z}{dr} \right)^{0.8297} \text{ Generalizado} \right]$$

para el rango de temperatura media, el factor de energía de activación de flujo $\left(\frac{\eta \Delta H}{RT_m} \right)$ varía en

tre 2.689 y 2.897 respectivamente. Para el calentamiento a 110 voltios, el factor de activación de flujo varía 0.269 y 0.286 para el rango de temperatura entre 123.50 y 124.92°F. Los valores promedio de la energía de activación de flujo resultaron 2221.50 BTU/lbmol y 75 BTU/lbmol para las temperaturas medias 112.94°F y 124.21°F respectivamente, o sea incremento de temperatura causa disminución de la energía de activación de flujo.

Introduciendo los valores de energía de activación de flujo como parámetros de corrección de temperaturas a las expresiones anteriores calculados en base al modelo isotérmico de Rabinowitsch:

i) $\tau_{rz} = 0.109059 \exp\left(\frac{1,600}{T}\right) \left(-\frac{dv_z}{dr}\right)^{1.4313}$ para $112.46 \leq T_m \leq 113.42^\circ\text{F}$

ii) $\tau_{rz} = 0,0030 \exp\left(\frac{1,621,20}{T}\right) \left(-\frac{dv_z}{dr}\right)^{4.2946}$ para $123.50 \leq T_m \leq 124.92^\circ\text{F}$

El efecto del incremento de la concentración del polímero sobre la naturaleza viscosa de la mezcla Polímero WSRN 3000 - Agua se observa en las Figuras Nos. 4-5 para 4000 ppm. A bajas temperaturas se observa el carácter dilatante con transición al carácter pseudoplástico para incremento del esfuerzo cortante aplicado, mientras a altas temperaturas la mezcla exhibe comportamiento pseudoplástico para todo el rango del esfuerzo cortante aplicado. El modelo isotérmico (figura señalada con la letra A) y el modelo generalizado de Rabinowitsch (figura señalada con la letra A') siguen el mismo comportamiento funcional, con valores superiores de las tasas de deformación para el modelo generalizado referido a un mismo valor de esfuerzo cortante, y la diferencia se acentúa con incremento de temperatura. La ecuación constitutiva no puede ser representada por el Modelo de Potencia dada la dependencia no lineal entre la viscosidad aparente y esfuerzo cortante a escala logarítmica, a tal efecto las representaciones viscosas son expresadas por el modelo de Ellis que encierre tres parámetros de correlación:

a) Para 70 voltios

i) Modelo Isotérmico $\tau_{rz} = \frac{1}{8.21 - 5.6 \cdot 10^{-8} \tau_{rz}^{-44.99}}$
 $\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)$ para $T_m = 103.22^\circ\text{F}$

ii) Modelo Generalizado $\tau_{rz} = \frac{1}{8.42 - 1.75 \cdot 10^{-13} \tau_{rz}^{-76.82}}$
 $\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)$ para $102.85 \leq T_m \leq 103.58^\circ\text{F}$

b) Para 90 voltios

i) Modelo Isotérmico $\tau_{rz} = \frac{1}{8.43 - 2.05 \cdot 10^{-10} \tau_{rz}^{-47.04}}$

$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)$ para $T_m = 113.20^\circ\text{F}$

ii) Modelo Generalizado $\tau_{rz} = \frac{1}{8.62 - 5.4 \cdot 10^{-5} \tau_{rz}^{-21.88}}$

$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)$ para $112.67 \leq T_m \leq 113.75^\circ\text{F}$

c) Para 110 voltios

i) Modelo Isotérmico $\tau_{rz} = \frac{1}{8.78 - 8.4 \cdot 10^{-8} \tau_{rz}^{-22.96}}$

$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)$ para $T_m = 124.30^\circ\text{F}$

ii) Modelo Generalizado $\tau_{rz} = \frac{1}{8.98 - 2.12 \cdot 10^{-8} \tau_{rz}^{-17.17}}$

$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)$ para $123.85 \leq T_m \leq 124.75^\circ\text{F}$

Las Figuras Nos. 6-7 muestran la caracterización viscosa para la mezcla bentonita-Agua al 4% (p/v) a tres niveles de calentamiento (70, 90 y 110 voltios) El diagrama esfuerzo cortante-tasa de deformación no resulta suficiente para la caracterización viscosa dado el alto rango del esfuerzo cortante aplicado, la condición necesaria está representada por el diagrama viscosidad aparente - esfuerzo cortante a escala logarítmica en combinación con la definición de fluido dilatante-incremento de viscosidad aparente con incremento del esfuerzo cortante aplicado. Puede afirmarse, que para el rango del esfuerzo aplicado, la mezcla Bentonita-Agua al 4% (p/v) exhibe comportamiento dilatante para todo el rango de condiciones operacionales (flujo y calentamiento). Las ecuaciones constitutivas dadas por el Modelo de Ellis son:

a) Para 70 voltios

i) Modelo Isotérmico $\tau_{rz} = \frac{1}{2.3559 + 2.7317 \tau_{rz}^{-1.2369}}$
 $\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)$ para $T_m = 100.14^\circ\text{F}$

ii) Modelo Generalizado $\tau_{rz} = \frac{1}{2.723 + 4.9077 \tau_{rz}^{-0.0128}}$
 $\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)$ para $99.03 \leq T_m \leq 101.25$

b) Para 90 voltios

i) Modelo Isotérmico $\tau_{rz} = \frac{1}{2.8678 + 2.6946 \tau_{rz}^{-1.3208}}$
 $\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)$ para $T_m = 111.44^\circ\text{F}$

ii) Modelo Generalizado $\tau_{rz} = \frac{1}{3.008 + 2.7582 \tau_{rz}^{-1.3096}}$

$$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right) \text{ para } 110.55 \leq T_m \leq 112.33^\circ\text{F}$$

c) 110 voltios

$$\text{i) Modelo Isotérmico } \tau_{rz} = \frac{1}{6.6766 - 0.0245 \tau_{rz}^{53.715}}$$

$$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right) \text{ para } T_m = 121.66^\circ\text{F}$$

$$\text{ii) Modelo Generalizado } \tau_{rz} = \frac{1}{10.7977 - 634.835 \tau_{rz}^{18.6556}}$$

$$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right) \text{ para } 120.83 \leq T_m \leq 122.50$$

El incremento de la concentración de bentonita en la mezcla bentonita-Agua, genera un cambio en el comportamiento viscoso de la mezcla de carácter dilatante a pseudoplástico, mientras las tasas de deformación aumentan con incremento de temperatura para el rango de esfuerzos cortantes aplicados (9).

El comportamiento viscoso de la solución Crudo-Boscán-Gas Oil en la relación volumétrica de 1:1. Se muestra en las Figuras Nos. 8-9. La mezcla exhibe un comportamiento dilatante o sea incremento de la viscosidad aparente con aumento del esfuerzo cortante aplicado de igual manera la tasa de deformación aumenta con temperatura y la viscosidad aparente disminuye con aumento de temperatura. Las ecuaciones constitutivas resultaron:

a) Para 70 voltios

$$\text{i) Modelo Isotérmico } \tau_{rz} = 0.066 \left(-\frac{dv_z}{dr}\right)^{4.0785} \text{ para..}$$

$$T_m = 115.73^\circ\text{F}$$

$$\text{ii) Modelo Generalizado } \tau_{rz} = 0.0812 \left(-\frac{dv_z}{dr}\right)^{3.4474}$$

$$\text{para } 113.46 \leq T_m \leq 118.00^\circ\text{F}$$

b) Para 90 voltios

$$\text{i) Modelo Isotérmico } \tau_{rz} = \frac{1}{5.9795 - 9,08.10^3 \tau_{rz}^{10.473}}$$

$$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right) \text{ para } T_m = 134.45^\circ\text{F}$$

$$\text{ii) Modelo Generalizado } \tau_{rz} = \frac{1}{6.02986 - 137.2956 \tau_{rz}^{7.547}}$$

$$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right) \text{ para } 133.42 \leq T_m \leq 135.50^\circ\text{F}$$

$$\text{c) Para 110 voltios, } \tau_w \leq 0.9144 \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}^2}$$

$$\text{i) Modelo Isotérmico } \tau_{rz} = 1.4274 \left(-\frac{dv_z}{dr}\right)^{-1.0959}$$

$$\text{para } T_m = 133.92^\circ\text{F}$$

$$\text{ii) Modelo Generalizado } \tau_{rz} = 1.6798 \left(-\frac{dv_z}{dr}\right)^{-1.3059}$$

$$\text{para } 132.67 \leq T_m \leq 135.17^\circ\text{F}$$

$$\text{d) Para 110 voltios, } \tau_w \geq 0.9144 \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}^2}$$

$$\text{i) Modelo Isotérmico } \tau_{rz} = \frac{1}{-2.5601 + 4.4914 \tau_{rz}^{0.7442}}$$

$$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right) \text{ para } T_m = 132.07^\circ\text{F}$$

$$\text{ii) Modelo Generalizado } \tau_{rz} = \frac{1}{-2.2909 + 4.2503 \tau_{rz}^{0.6515}}$$

$$\left(-\frac{dv_z}{dr}\right) \text{ para } 131.47 \leq T_m \leq 132.67^\circ\text{F}$$

El incremento de la proporción volumétrica del Crudo Boscán sobre la mezcla Crudo Boscán - Gas Oil tiende a reducir las tasas de deformación sin efectos apreciables por variación de temperatura, observándose un comportamiento dilatante para todo el rango de esfuerzos cortantes aplicados. Para el Modelo Generalizado resultan valores de la tasa de deformación mayores $\frac{dv_z}{dr}$ y, en consecuen-

cia las viscosidades aparentes resultan menores comparadas a las evaluadas por el Modelo Isotérmico.

CONCLUSIONES

El Modelo Generalizado referido al Modelo Clásico de Rabinowitsch introduce las variables de temperatura media del fluido a la pared, unido a cambios de caudales y presiones para la caracterización viscosa de fluidos a través de una Geometría tubular bajo la condición térmica de flujo de calor constante desde la pared (resistencia eléctrica)

Tanto el Modelo clásico de Rabinowitsch como el Modelo Generalizado presentan la misma relación funcional entre esfuerzo cortante y tasa de deformación, observándose diferencias de valores con incremento de temperatura y concentración. El uso del modelo clásico puede conducir a serios errores cuyas magnitudes dependen del rango de las tasas de deformación, para la mezcla Polímero WSRN 3000 - Agua a 2000 ppm resultan hasta del 95% en la predicción del esfuerzo cortante.

El Modelo Generalizado permite de manera fácil la evaluación de la energía de activación de flujo para cada fluido viscoso como una propiedad de

transporte y como un parámetro de corrección para el Modelo Isotérmico de Rabinowitsch.

NOMENCLATURA

$C_{P, T}$: Capacidad calorífica a presión constante.
 $G_{z, x}$: Número de Graetz local
 l : Longitud de tubería
 m : Factor de consistencia del modelo de potencia.
 Nu_x : Número de Nusselt local
 n : Índice de comportamiento viscoso del modelo en potencia
 Q : Caudal
 r : Posición radial
 R : Radio de tubería
 R : Constante universal de los gases
 T : Temperatura absoluta
 T_m : Temperatura media del fluido
 T_w : Temperatura del fluido a la pared
 $T(r, z)$: Temperatura del fluido a cualquier (r, z)
 V_z : Velocidad en la dirección axial
 $V_z(o)$: Velocidad en el centro de la tubería
 V_z : Velocidad promedio en la dirección axial

Letras Griegas:
 ρ : Densidad promedio del fluido

τ : Esfuerzo cortante
 τ_w : Esfuerzo cortante a la pared de la tubería
 ΔH : Energía de la activación de flujo
 ΔP : Diferencia de presión

LITERATURA CITADA

- 1) BASSET, C. and WELTY, J., "Non-newtonian Heat Transfer in the Thermal Entrance Region of Uniformly Heated, Horizontal Pipes", AICHE, J., 21, 699 (1975).
- 2) VILLALOBOS, F., GUTIERREZ, E. y GARCIA, C., "Ecuaciones Constitutivas para Fluidos Puramente Viscosos", Trabajo presentado en las Primeras Jornadas Científico-Técnicas de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo (Noviembre 1977).
- 3) BIRD, R., Chem. Ing. Teck., 31, 569 (1959).
- 4) MITSUISHI, N. and MIYATAKE, O., Chem. Eng. Japan, 5, 82 (1967).
- 5) MICHYASHI, I., Bull. Jap. Soc. Mech. Engrs., 5, 315(1962).
- 6) SCHENK, J. and VAN LAAR, J., Appl. Scientific Research, Sec. A, 7, 449 (1958).
- 7) COCHRANCE, G., Ph. D. thesis, Oregon State University, Corvallis (1969).
- 8) ALVAREZ, H., BUSTOS, N. y GARCIA, C. (Asesor), "Transferencia de Calor en Fluidos NoNewtonianos", Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo (Junio 1978).
- 9) FONTALVO, A., SANCHEZ, A. y GARCIA, C. (Asesor), "Modelo Generalizado de Rabinowitsch", Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo (Abril 1980).

Recibido el 2 de junio de 1981

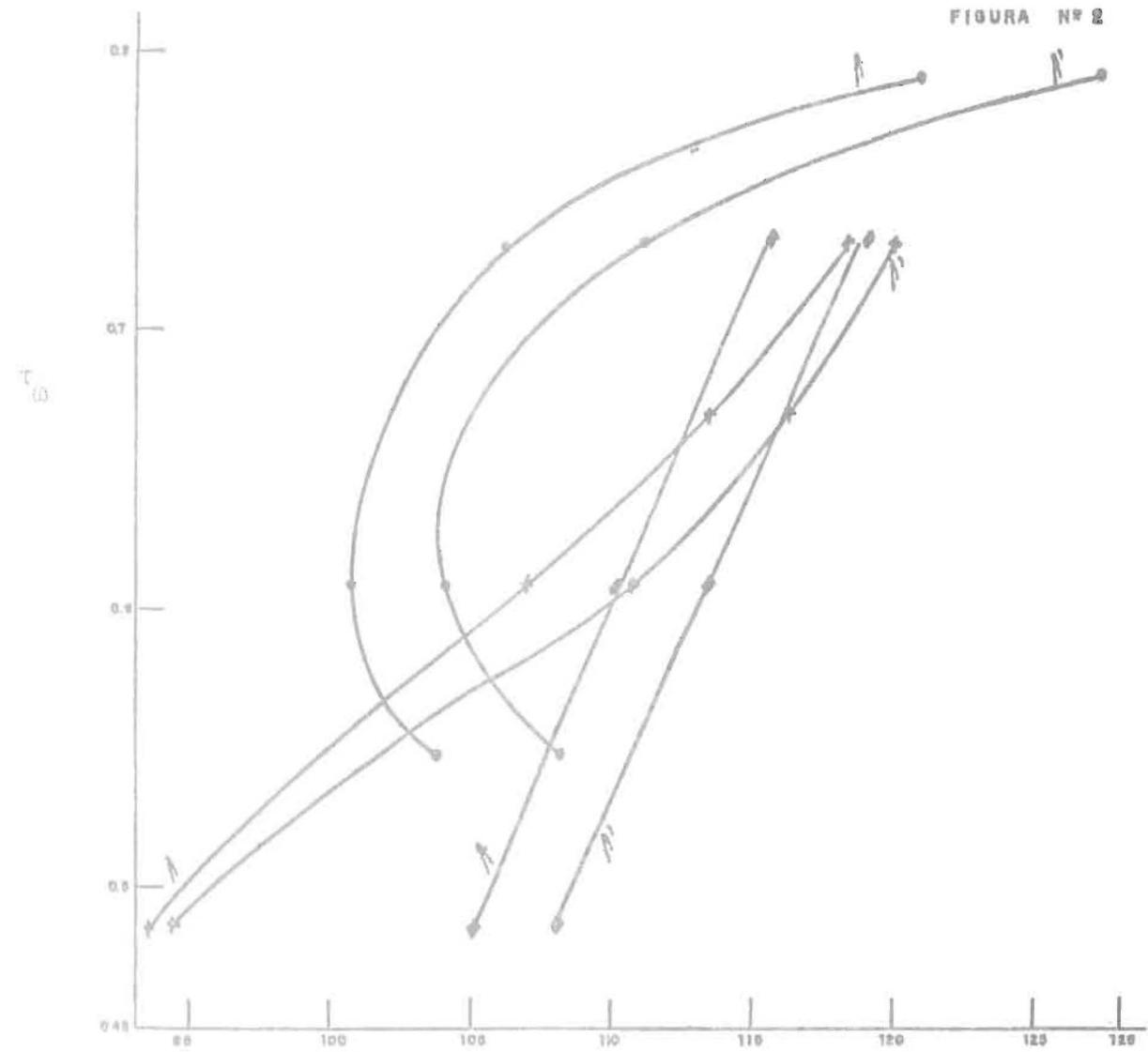
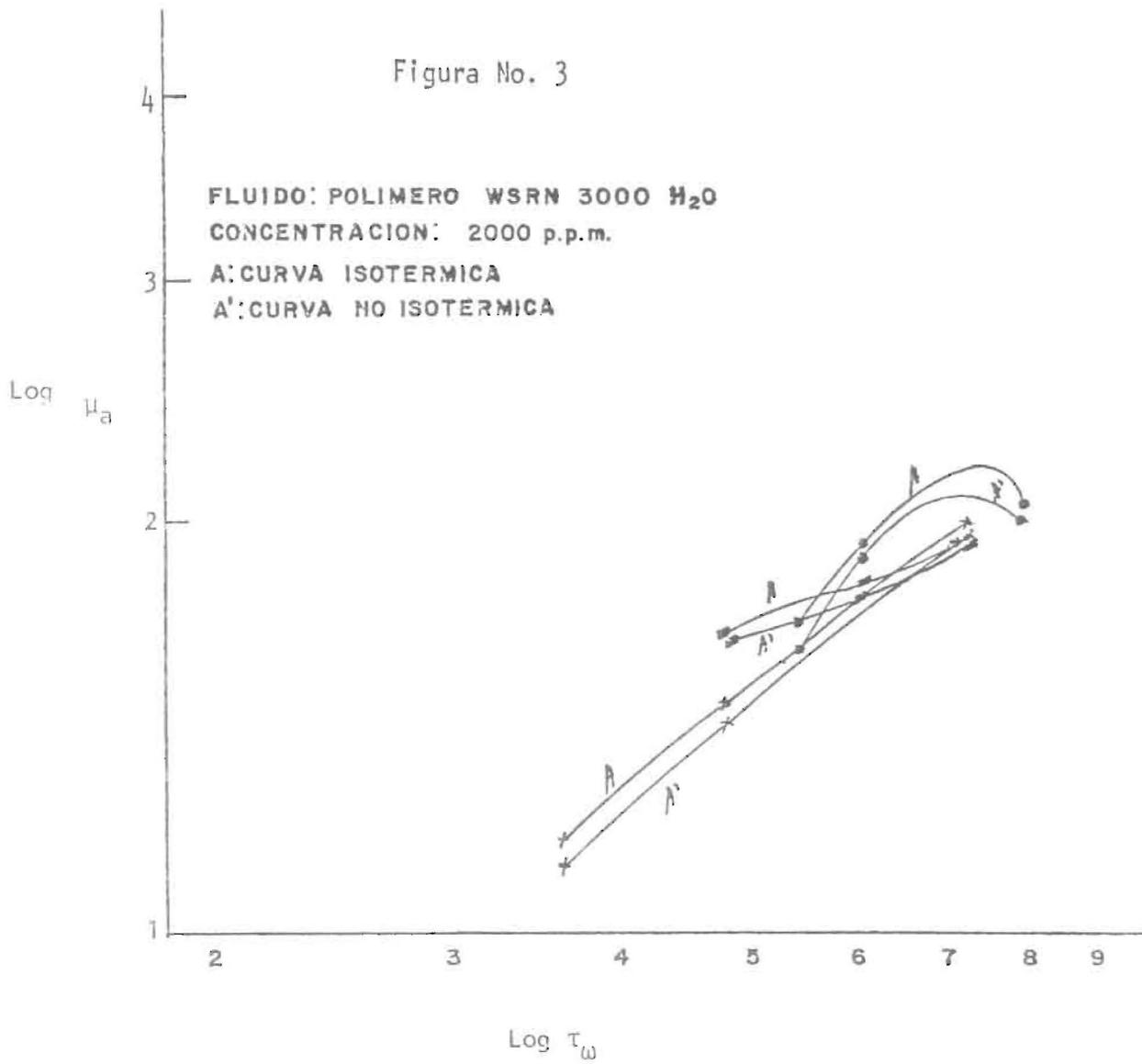


FIGURA Nº 2

FLUIDO: POLIMERO WSRN 3000-H₂O
CONCENTRACION: 2000 p.p.m.
POSICION DEL REOSTATO
O = 70 VOLTIOS
+ = 90 VOLTIOS
■ = 110 VOLTIOS
A = CURVA ISOTERMICA
A' = CURVA NO ISOTERMICA

(dvz/dr)

Figura No. 3



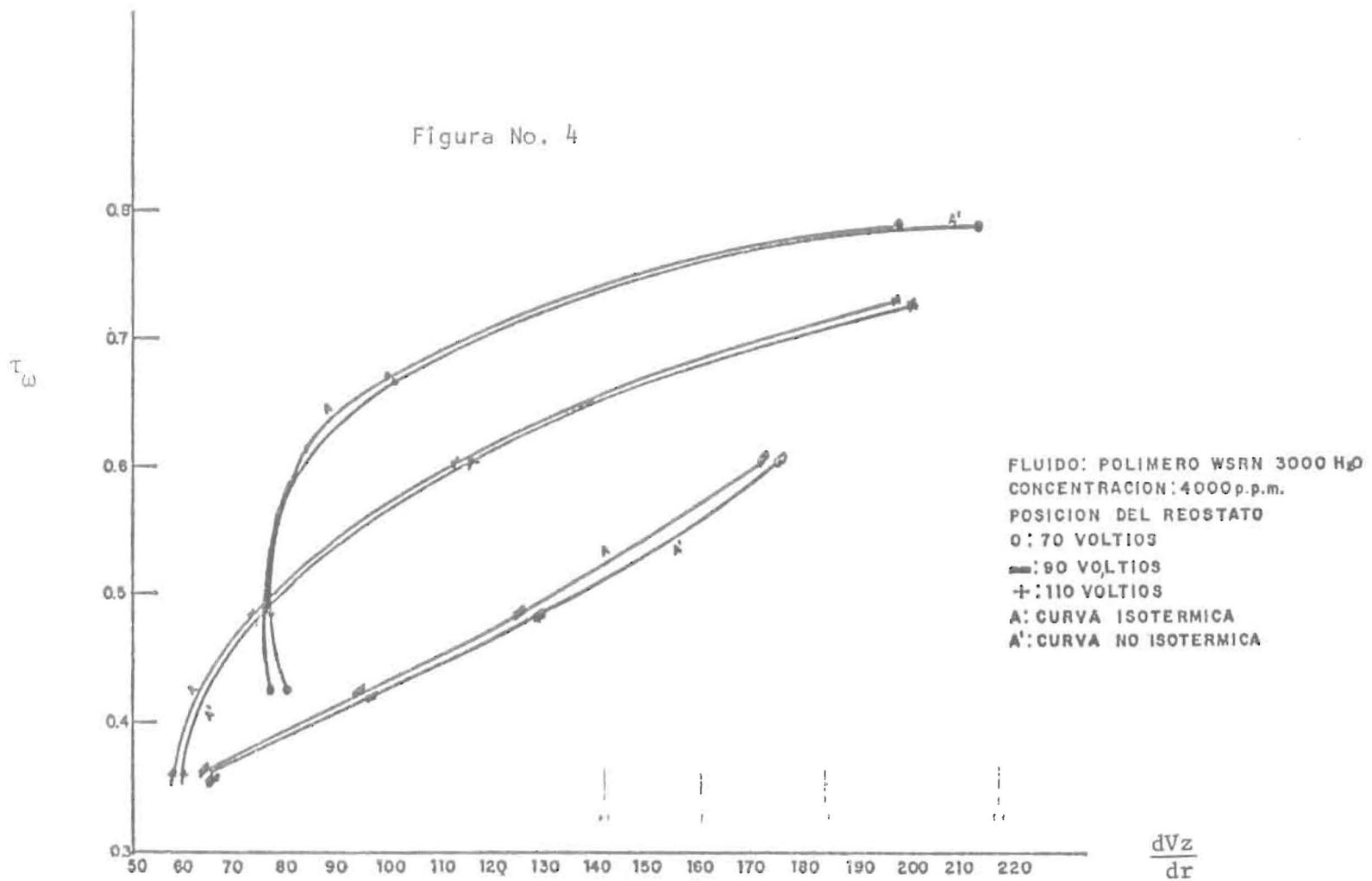
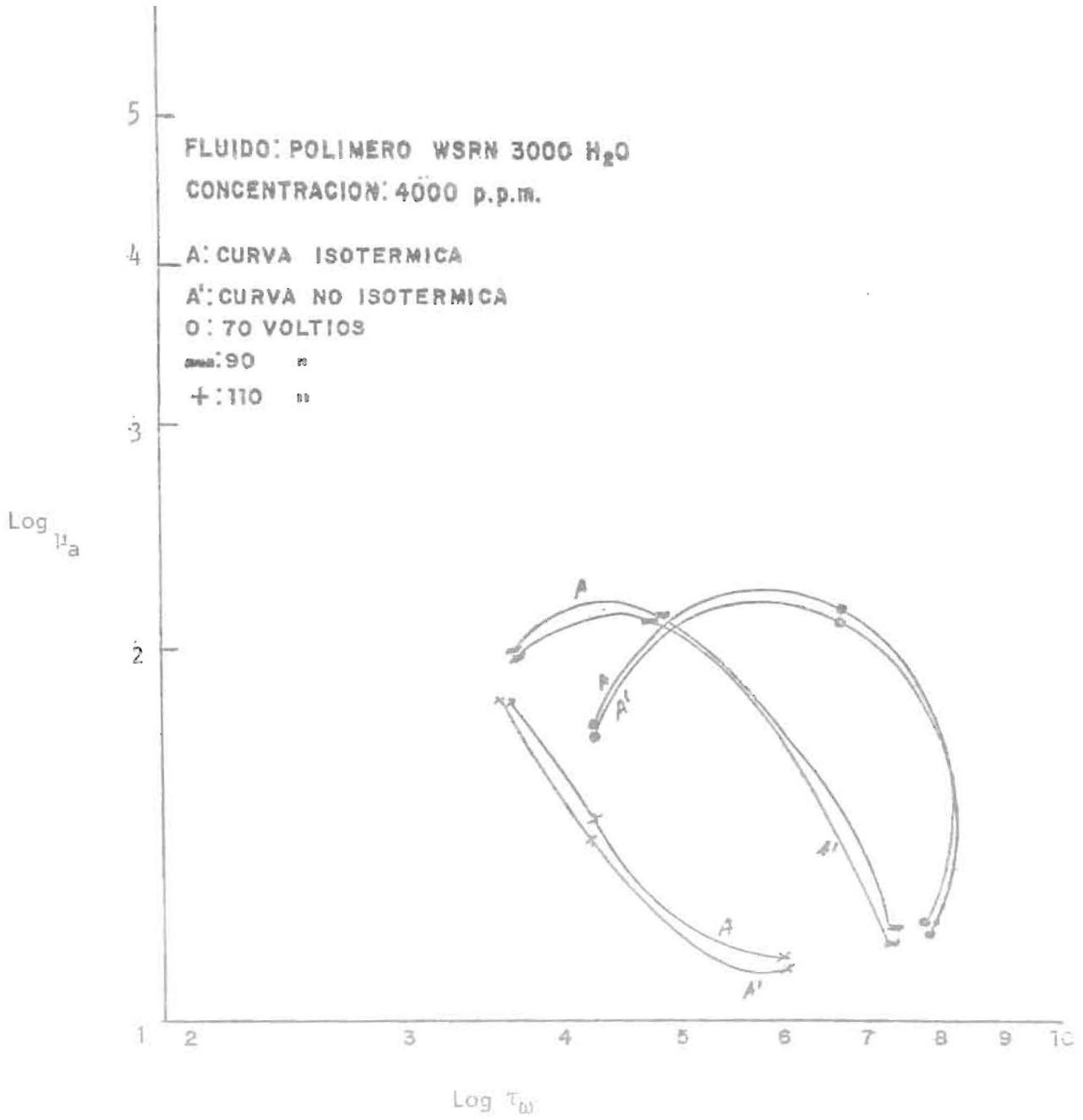


Figura No. 5



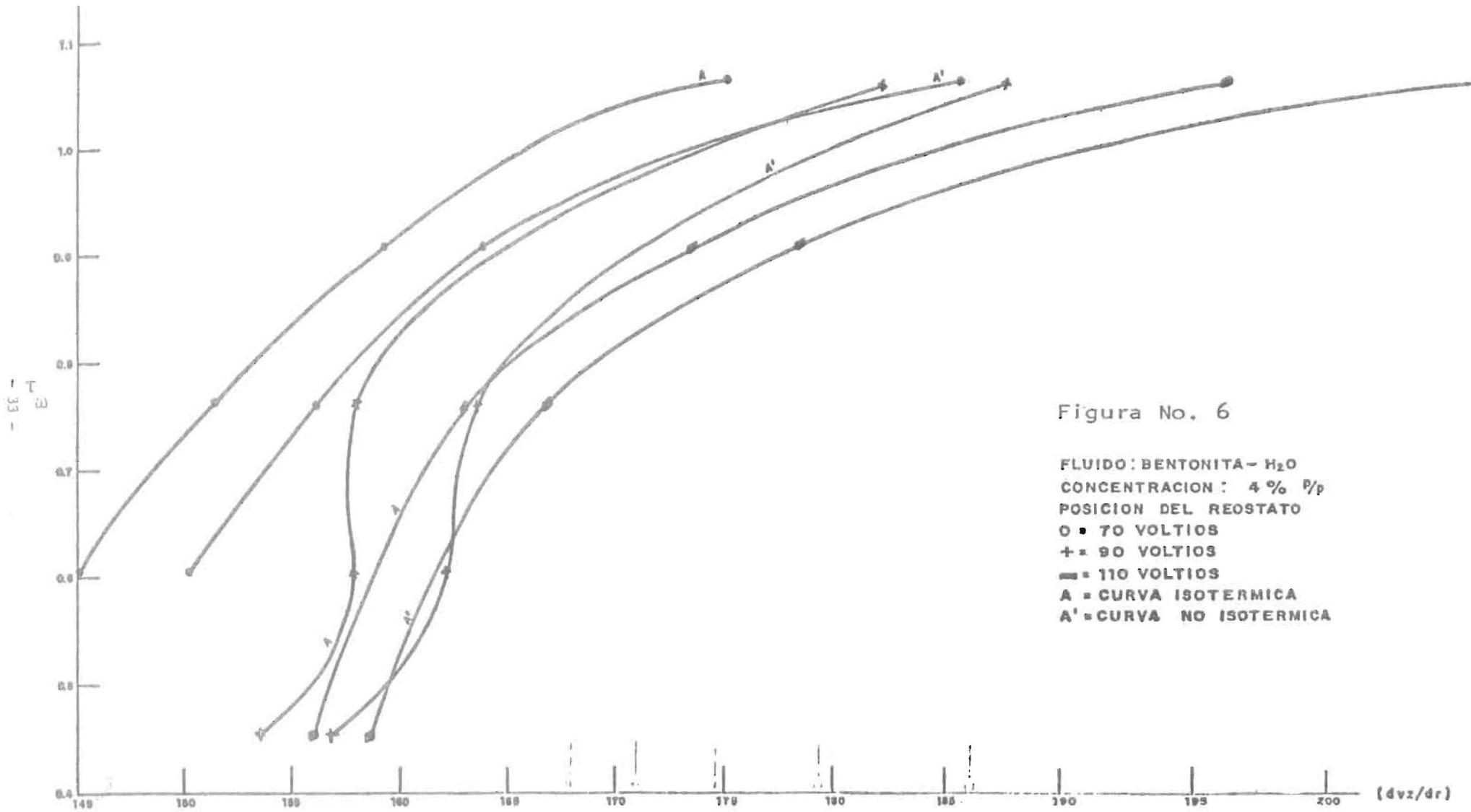
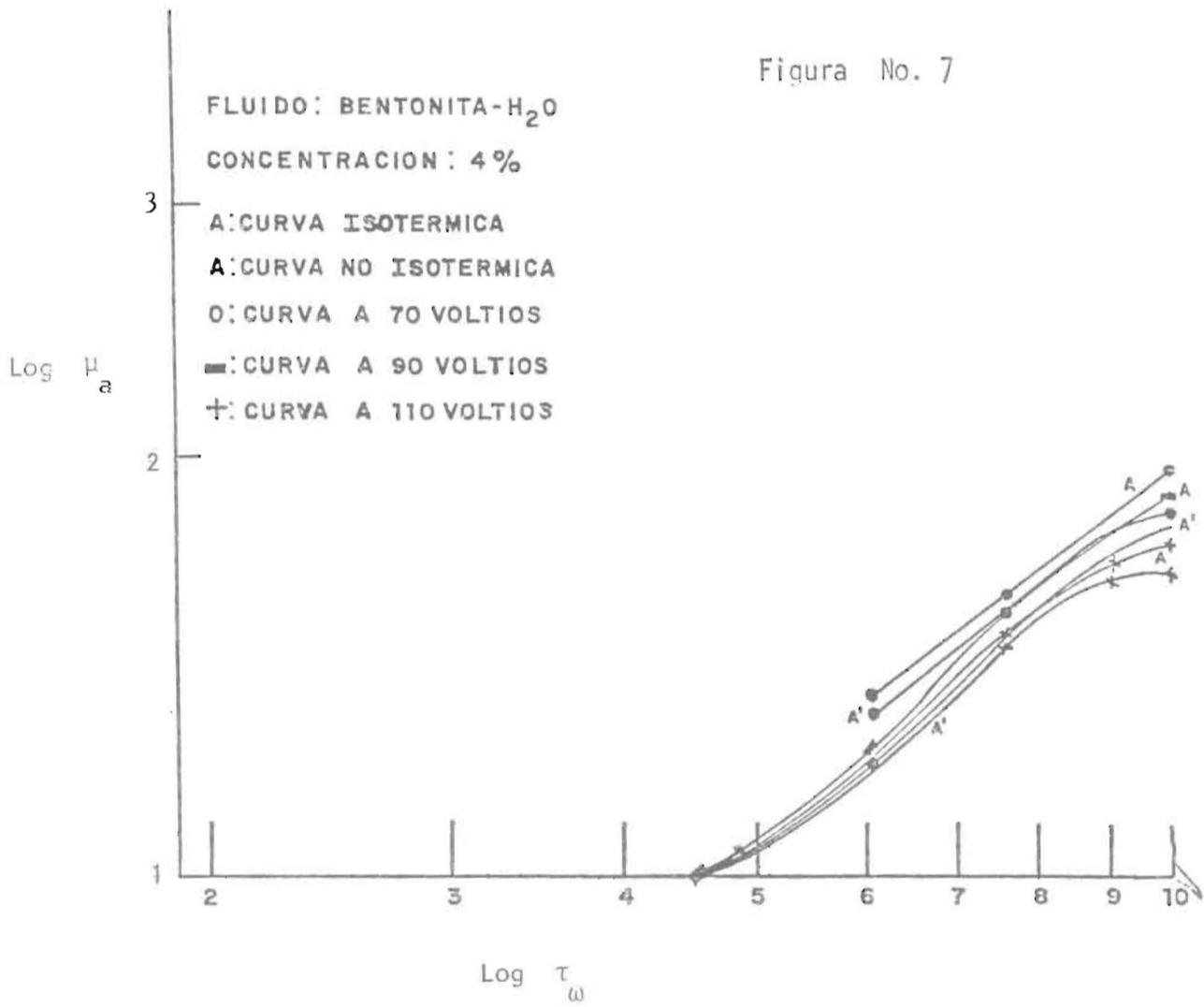


Figura No. 6

FLUIDO: BENTONITA - H₂O
CONCENTRACION: 4% P/P
POSICION DEL REOSTATO
O • 70 VOLTIOS
+ • 90 VOLTIOS
■ • 110 VOLTIOS
A = CURVA ISOTERMICA
A' = CURVA NO ISOTERMICA

Figura No. 7



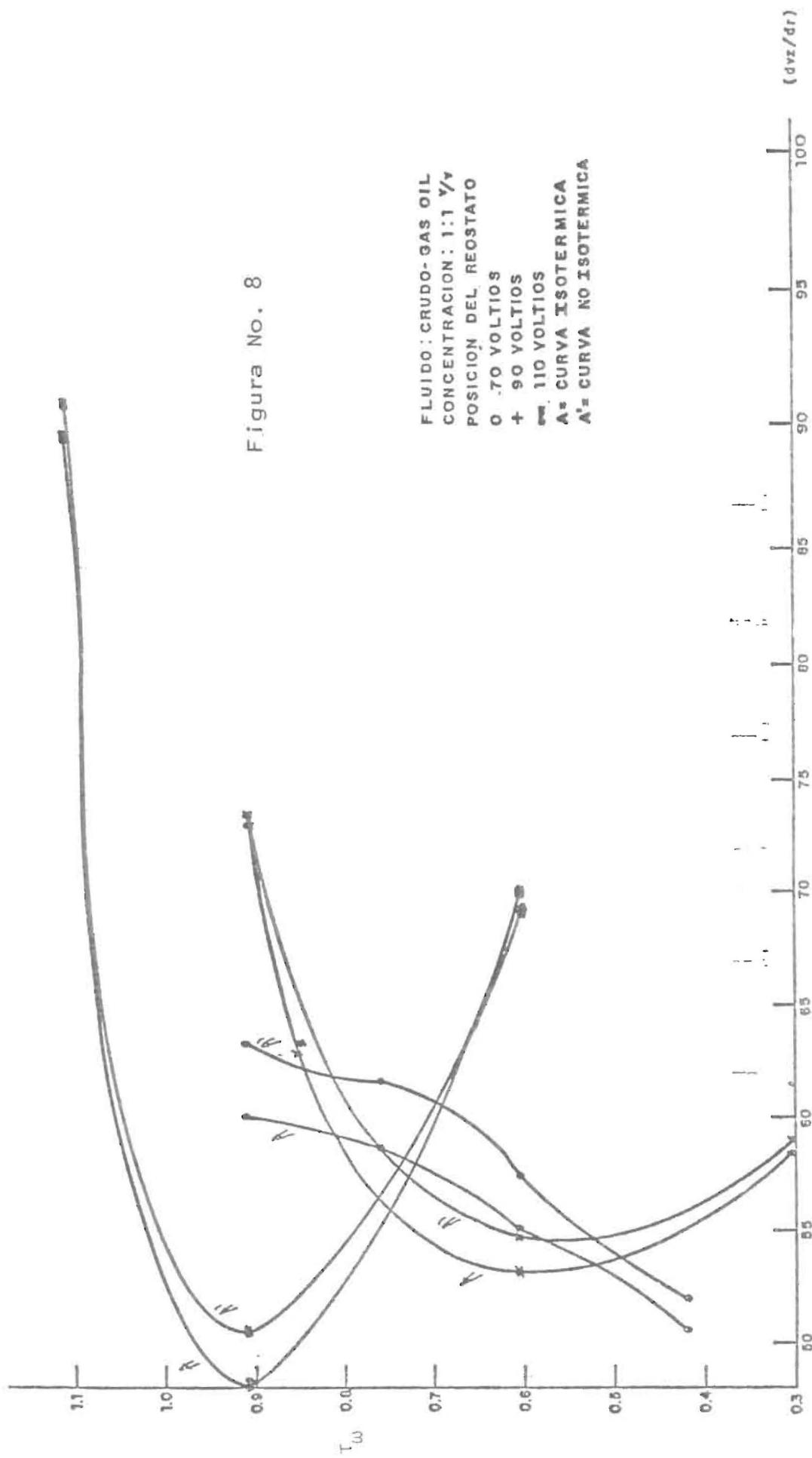


Figura No. 8

FLUIDO: CRUDO-GAS OIL
 CONCENTRACION: 1:1 $\frac{V}{V}$
 POSICION DEL REOSTATO
 0 .70 VOLTIOS
 + 90 VOLTIOS
 x 110 VOLTIOS
 A= CURVA ISOTERMICA
 A'= CURVA NO ISOTERMICA

Figura No. 9

