



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**TESIS DONADA POR
D. G. B. - UNAM**

***“DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES
REOLOGICAS DE SUSPENSIONES DE
ARCILLA.”***

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
METALURGICO**

**P R E S E N T A :
ACOSTA GONZALEZ FCO. ANDRES**

1 9 8 3



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado según el tema:



PROFESIONALES
FAC. DE QUÍMICA

PRESIDENTE: Prof. Fernando Maldonado Mendoza
VOCAL: Prof. Jorge Ornelas Tabares
SECRETARIO: Prof. José Gabriel de León Roa
1er. SUPLENTE: Prof. Guillermo Antúnez Cabel
2do. SUPLENTE: Prof. Bernardo Fabián Campillo Illanes

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de metalurgia extractiva, edificio "D", Facultad de Química, Ciudad Universitaria, U.N.A.M.

Nombre completo y firma del asesor del tema:

M. en C. FERNANDO J. MALDONADO MENDOZA

Nombre completo y firma del sustentante:

FRANCISCO ANDRES ACOSTA GONZALEZ

I N D I C E

	Pág.
OBJETIVO	1
<u>CAPITULO I</u> INTRODUCCION	2
1. Importancia del trabajo experimental	2
2. Definición de suspensión de arcilla	6
<u>CAPITULO II</u> FLUIDOS NO-NEWTONIANOS	16
1. Modelos de comportamientos puros	17
2. El modelo de la ley de la potencia	41
<u>CAPITULO III</u> COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE SUSPENSIONES DE ARCI-LLAS	44
1. Pseudoplasticidad	50
2. Dilatancia	51
3. Tixotropía	53
4. Tensión de fluencia	53
5. Elastoviscosidad	54
<u>CAPITULO IV</u> VISCOSIMETROS	56
1. Viscosímetros de flujo telescópico	56
2. Viscosímetros de flujo circular	61
3. Otros viscosímetros	67

<u>CAPITULO V</u>	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL APARATOS EMPLEADOS	73
<u>CAPITULO VI</u>	RESULTADOS EXPERIMENTALES DISCUSION	109
<u>CAPITULO VII</u>	CONCLUSIONES	114
	FUENTES DE ERROR	116
	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	117
APENDICE I.	PRACTICA DE LABORATORIO PRO PUESTA PARA UN CURSO DE <u>FÉ</u> NOMENOS DE TRANSPORTE	119
APENDICE 2.	MANEJO DEL VISCOSIMETRO BROOKFIELD	- 128
BIBLIOGRAFIA		132

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es ensayar y -
evaluar una metodología para medir las propieda -
des reológicas de suspensiones de arcilla, utili -
zando el modelo de la ley de la potencia, con un -
viscosímetro Brookfield LVF.

Se determinaron las curvas reológicas de -
suspensiones de arcilla con diferentes porcenta -
jes de sólidos y potencial de hidrógeno (pH), a -
un tamaño de partícula, temperatura y presión -
constantes, y en estado estable. En base a los -
resultados experimentales, se propone conformar -
una práctica de laboratorio para un curso de fenó -
menos de transporte.

INTRODUCCION

1. IMPORTANCIA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

En cualquier proceso industrial existen etapas de transporte de fluidos, ya sean reactivos, productos o fluidos de servicio (como agua, vapor).

La selección de los equipos e instalaciones necesarias para tal fin, se logra mediante el conocimiento de las propiedades de dichos fluidos. Las propiedades químicas permiten seleccionar los materiales de los equipos, mientras que las propiedades físicas son la base para la elección de las dimensiones y requerimientos de energía de instalaciones y equipos. Una propiedad física fundamental, es la viscosidad (o resistencia a fluir) la cual, en general, se determina experimentalmente¹.

¹/ Para el caso de gases, algunos líquidos y algunas suspensiones, existen estimaciones teóricas basadas en las teorías: cinética de los gases, Eyring y Einstein, respectivamente (1,6)

En los procesos hidrometalúrgicos es común el transporte de sólidos con la ayuda de algún fluido, es decir en forma de suspensiones. El manejo de estas suspensiones requiere conocer sus propiedades tanto químicas como físicas, en particular es de interés conocer la viscosidad de éstas.

Dependiendo de si la suspensión es sedimentada o no-sedimentada, se usará uno de los siguientes enfoques para la evaluación de la "viscosidad" o resistencia a fluir:

a) Si la suspensión es sedimentada², se pueden estimar las instalaciones y equipos para su transporte, usando ciertas técnicas (2) que son, actualmente, satisfactorias.

b) Si la suspensión es no-sedimentada, es necesario

2/ Existen varias definiciones al respecto, la que se usará en este trabajo se introducirá posteriormente.

cesario conocer su viscosidad. La determinación de esta propiedad es satisfactoria sólo si se hace en forma experimental; de ahí la importancia de establecer una metodología simple y confiable para medirla.

La viscosidad es una propiedad del fluido - que depende de un número determinado de variables. Mientras más variables haya que considerar, para definir a la viscosidad adecuadamente, decimos - que el comportamiento del fluido es más complejo y por lo tanto, más complejo será el método experimental para determinarlo.

En la industria se manejan fluidos complejos y los métodos usados para medir la viscosidad, consideran a éstos como fluidos menos complejos; el error involucrado al hacer tal simplificación, se compensa dando cierto margen de error a los cálculos.

Si se quiere mayor eficiencia y economía en las operaciones industriales, es necesario conocer mejor el fluido para evaluar adecuadamente (sin excesos) las instalaciones (sus dimensiones) y equipos (energía consumida), requeridos para su transporte.

Las suspensiones no-sedimentadas son fluidos complejos y son los fluidos que se considerarán a lo largo de este trabajo.

Por último, cabe aclarar que existen aparatos sofisticados y costosos³, los cuales permiten medir las propiedades de flujo (propiedades reológicas), de muchos fluidos, sin embargo, no se cuenta con tales recursos.

3/ Reogonómetro Weissenberg, por ejemplo.

2. DEFINICION DE SUSPENSION DE ARCILLA

Primero definiremos el término suspensión.

Suspensión: es una mezcla de 2 fases, una sólida y otra líquida. Llamándosele a la fase líquida, por su continuidad en la mezcla, fase dispersante; y a la sólida, fase dispersa.

La fase sólida, tal como se indicó, se encuentra dispersa en forma de partículas (fase separada de sus alrededores por una superficie continua).

En el comportamiento reológico de las suspensiones influyen las propiedades físicas y físicoquímicas de la fase sólida siguientes:

- tamaño promedio de partícula,
- forma de las partículas,
- densidad de las partículas,
- naturaleza eléctrica de la superficie de -

las partículas.

La dispersión de tamaños es otra variable - importante cuando podemos asociar una dispersión de tamaños dada a un valor determinado de viscosidad.

Las propiedades, de la fase dispersante, - que afectan el comportamiento reológico de la suspensión son:

- Polaridad: de ésta depende la interacción electrostática entre las fases dispersa y dispersante, especialmente cuando se tienen partículas entre 0.002 y 0.2 micrómetros de diámetro⁴.

- Viscosidad: de ésta depende, en buena medida, la resistencia al flujo de la suspensión.

^{4/} La división no es tajante, por lo que se puede reportar algún otro valor. El valor dado se tomó de la literatura sobre partículas -- (3).

- Densidad: aunque no es determinante para los efectos de este trabajo, la consideramos porque de ella depende, fundamentalmente, la energía consumida en los equipos de transporte.

Para caracterizar completamente a una suspensión es necesario conocer, además de la naturaleza de las fases dispersa y dispersante, la proporción de éstas en la suspensión.

Una vez establecido lo que es una suspensión, procederemos a definir las fases dispersa y dispersante con la que se trabajó.

FASE DISPERSA:

A R C I L L A

La arcilla es un material natural de textura muy fina, cuando se moja es plástica, y cuando está seca es dura y compacta.

La arcilla consiste principalmente de partí

culas de minerales mezcladas con materia orgánica y/o mezcladas con otros minerales.

La arcilla es, esencialmente, un producto de la erosión natural sobre rocas ígneas y algunos tipos de rocas metamórficas. Bajo condiciones de erosión química y bioquímica, las arcillas pueden también provenir de rocas sedimentarias.

El tamaño de grano de una arcilla típica es menor o igual que 2 micras (4).

Los principales minerales que constituyen a las arcillas son silicatos que forman capas cristalinas (filosilicatos), excepto el grupo de la sepiolita-paligorskita, el cual está constituido por cadenas de silicatos. Los silicatos, en capas cristalinas, están formados por combinaciones de 2 unidades estructurales: un tetraedro silicio-oxígeno y un octaedro aluminio-hidróxido, (figura 1).

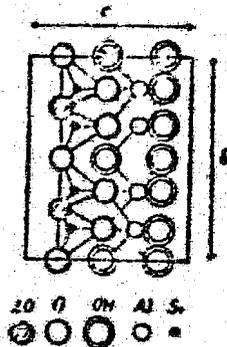


Figura 1. Estructura cristalina de los minerales arcillosos (13).

Existen minerales no-arcillosos que por tener textura fina pueden acompañar a los minerales arcillosos. A continuación se da una clasificación (basada en el reporte del Comité de Nomenclatura de la Asociación Internacional Mineralógica, 1968 (14 en 4)) tanto de los minerales arcillosos (tabla 1) como de los no-arcillosos (tabla 2).

Los minerales no-arcillosos constituyen minoritariamente a la arcilla y tienen una estructura químico-mineralógica esencialmente distinta a los componentes básicos de la arcilla.

TABLA 1. CLASIFICACION DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

GRUPO	SUBGRUPO	EJEMPLOS Y FORMULAS Q.
(x = carga por fórmula unitaria)		
CAOLINITA-SERPENTINA (x = 0)	CAOLINITAS	caolinita ... $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
	SERPENTINAS	haloisisita $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$ crisotilo, lizardita y - antigorita ... $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
PIROFILITA-TALCO (x = 0)	PIROFILITAS TALCOS	pirofilita $H_2Al_2(SiO_3)_4$ talco $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
MONTMORILLONITA-SAPONITA (x = 0.25-0.60)	MONTMORILLONITAS	montmorillonita $(Na, Ca)_{0.33}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ beidellita $(Na, Ca/2)_{0.33}Al_2(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ nontronita $Na_{0.33}Fe_2(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ saponita $(Mg, Al, Fe)_3(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2$ hectorita..... $Na_{0.33}(Mg, Li)_3Si_4O_{10}(F, OH)_2$ sauconita..... $Na_{0.33}Zn_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$
	SAPONITAS	

VERMICULITA (x = 0.60-0.9)	VERMICULITAS DIOCTAEDRICAS . VERMICULITAS TRIOCTAEDRICAS	vermiculita dioctaedrica vermiculita trioctaedrica, (ambas con la siguiente fórmula la general) $(Mg, Fe, Al)_3 (Al, Si)_4 O_{10} (OH)_2$ · 4H ₂ O
MICA (x = 1)	MICAS DIOCTAEDRICAS MICAS TRIOCTAEDRICAS	moscovita .. $H_2 K Al_3 (SiO_4)_3$ paragonita $Na Al_3 Si_3 O_{10} (OH)_2$ biotita $H_2 K (Mg, Fe)_3 Al (SiO_4)_3$ Flogopita $H_2 K Mg_3 Al (SiO_4)_3$
MICA FRAGIL (x = 2)	MICAS FRAGILES DIOCTAEDRICAS MICAS FRAGILES TRIOCTAEDRICAS	margarita .. $Ca Al_4 Si_2 O_{10} (OH)_2$ clintonita $Ca (Mg, Al)_3 (Al_3 Si) O_{10} (OH)_2$
CLORITA (x variable)	CLORITAS DIOCTAEDRICAS CLORITAS TRIOCTAEDRICAS	pennina $(Mg, Fe, Al)_6 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_8$ clinoclora $H_{8.85} Al_2 Si_3 O_{18}$ $\frac{9}{8}$

TABLA 2. MINERALES NO-ARCILLOSOS ENCONTRADOS EN LAS ARCILLAS

MINERAL	PRESENCIA OBLIGATORIA EN ALGUNAS ARCILLAS	COMO DEPOSITO RESIDUAL	COMO MATE- RIAL SEDI- MENTADO
cuarzo	+	+	+
feldespato	+	?	+*
dolomita	+
calcita	+	+***
óxidos de hierro	+	+	+
zeolitas	+

Nomenclatura:

+ Presente

.... Ausente

? Posiblemente presente, dependiendo del clima

* Depende de las condiciones atmosféricas y del transporte

*** Generalmente en la forma de partículas foraminíferas y de fragmentos de conchas.

Para completar una definición general de las arcillas resta mencionar las condiciones bajo las cuales se encuentran en la naturaleza, que son:

- 1) Arcillas producidas por el intemperismo de minerales.
- 2) Los minerales originales, alterados, pueden ser transportados por el viento y repositados, dando origen a un yacimiento de arcillas. El tiempo que tarda en efectuarse dicha lixiviación se mide geológicamente.

Los minerales que al erosionarse dan lugar a la arcilla son: feldespatos, algunos minerales ferromagnesianos (olivino, piroxenas, anfíbulas, mica), entre otros.

La arcilla sobre la cual trata el presente trabajo, proviene de Coacoyula, Guerrero, y fue-

caracterizada en trabajos anteriores (5) mediante el uso de análisis químico, análisis térmico diferencial, análisis termogravimétrico y rayos X, -- arrojando los resultados siguientes:

ANALISIS QUIMICO

SiO ₂	43.13%		
TiO ₂	0.66%	H ₂ O ⁺	15.70% ... a 750 °C, 24 h
Al ₂ O ₃	35.29%		
Fe ₂ O ₃	1.72%	H ₂ O ⁻	0.48% ... a 110 °C, 2 h
MgO	0.00%		
CaO	0.00%		

Los análisis termogravimétrico, térmico diferencial y de rayos X, señalaron que se trataba de una arcilla caolinítica.

Ahora, se procederá a definir la fase dispersante con la que se trabajó.

FASE DISPERSANTE:

A G U A

Las propiedades del agua de interés para este trabajo, son:

- a) Polaridad: es un líquido polar, asociando las cargas negativas al oxígeno y las positivas al hidrógeno.
- b) Viscosidad: es aproximadamente igual a un centipoise (10^{-3} Pa.s). Su variación con la temperatura se encuentra registrada en la literatura (6).

Además de lo anterior, se sabe que no hay reacción química entre el agua y la arcilla (por lo menos a temperatura ambiente y presión atmosférica).

FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

Dado el comportamiento de la suspensión de arcilla (fluido no-newtoniano), es necesario ubicarlo dentro del contexto general de la reología. La reología es la ciencia que estudia las relaciones entre las deformaciones de los cuerpos con las tensiones aplicadas (esta relación es importante para seleccionar los sistemas de transporte).

Llamamos deformación al cambio en la forma y/o volumen que sufren los cuerpos. Si tenemos cambio en la forma y no en el volumen, se habla de una deformación de corte; pero si sólo hay cambio en el volumen entonces tenemos una deformación volumétrica.

Si el volumen aumenta, se tiene una dilatación; pero si disminuye, una compresión.

En forma muy breve se puede decir que una tensión es una fuerza por unidad de área. Una tensión es isotrópica sólo si como único efecto produce una deformación volumétrica. Una tensión de corte es aquella que sólo puede producir una deformación de corte.

Se le llama estado de tensiones a la suma de tensiones isotrópicas y de corte. Análogamente, se le llama estado de deformaciones a la suma de las deformaciones volumétricas y de corte.

La relación funcional, entre los estados de tensiones y deformaciones, depende del tipo de material. A la relación anterior se le conoce como ecuación constitutiva.

1. MODELOS DE COMPORTAMIENTOS PUROS

Cuando se desea encontrar la relación entre los estados de tensiones y deformaciones⁵

5/ De aquí en adelante al referirnos a la deformación, a menos que se especifique otra cosa, entenderemos que se trata de deformación de corte.

para un material dado (lo que es equivalente a ~~determinar sus propiedades reológicas~~), puede notarse que, si se considera el comportamiento global del material como el resultado de la suma de varios comportamientos puros, encontrándose éstos en diferente proporción, será más fácil establecer generalizaciones y simplificaciones para obtener la relación reológica. Es por lo anterior que se ha propuesto en forma idealizada y arbitraria, la clasificación reológica dada en la figura 2.

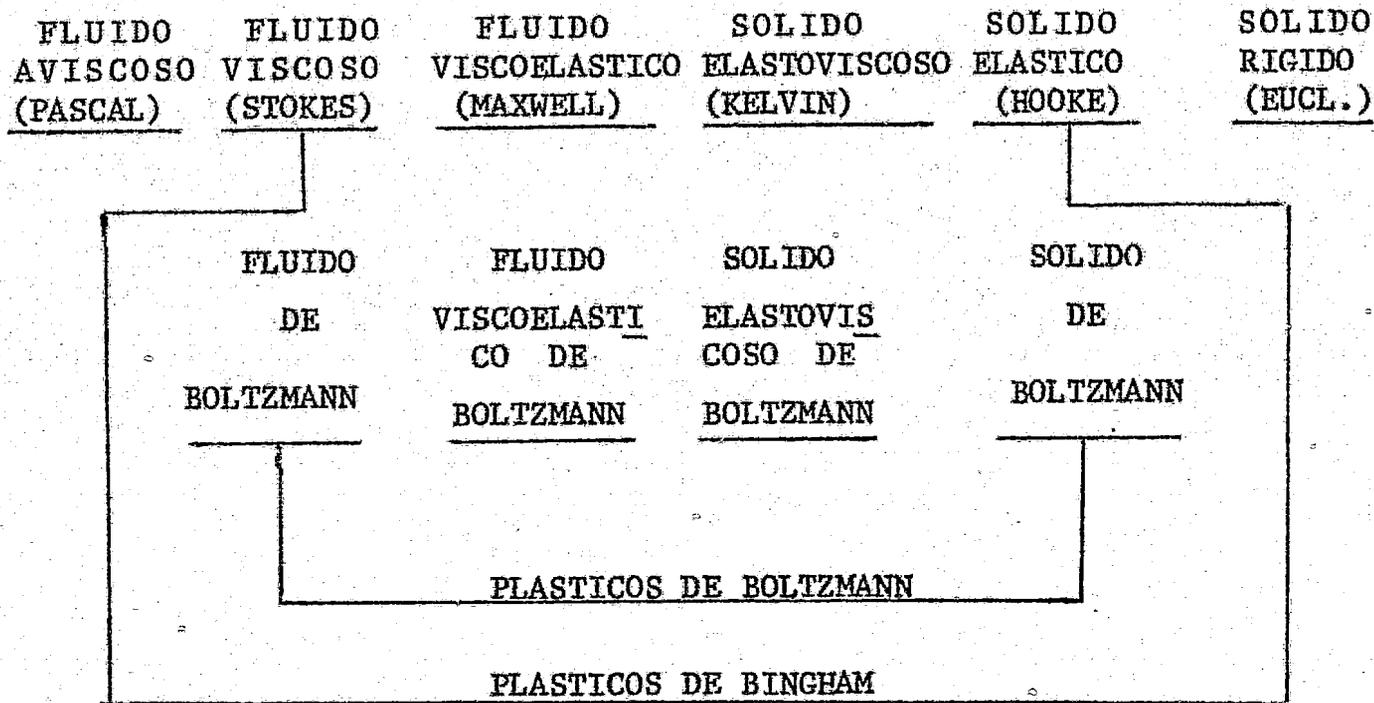


FIGURA 2. Clasificación reológica de los materiales (7).

Debemos recalcar que los materiales presentan todos los comportamientos anteriores, pero -- bajo determinadas circunstancias (tipo de fluido, condiciones de presión, temperatura, movimiento mecánico), algún comportamiento predomina sobre los demás, y es aquí donde se presenta la simplificación del problema.

FLUIDO VISCOSO:

En estos materiales existe una relación entre las tensiones aplicadas y la rapidez de deformación, y no entre las tensiones y la deformación producida.

Modelo mecánico: consiste en un recipiente lleno con líquido, dentro del cual está un pistón con perforaciones (figura 3).

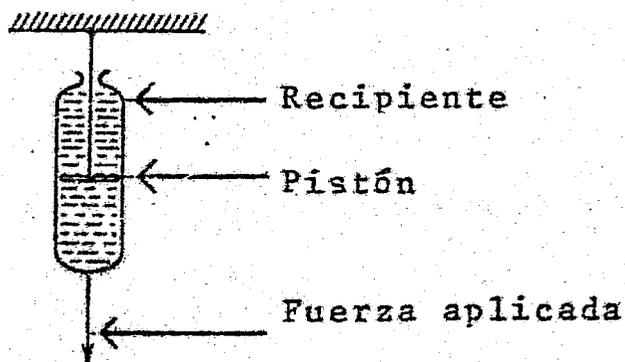


Figura 3. Modelo mecánico para el fluido viscoso (7).

En este caso, la fuerza aplicada y el desplazamiento del recipiente son análogos al estado de tensiones y al de deformaciones, respectivamente.

Modelos matemáticos: si llamamos τ a la tensión de corte y $\dot{\gamma}$ a la velocidad de deformación, se puede establecer:

la proporción: $\tau \propto \dot{\gamma}$
o la igualdad: $\tau = \mu \dot{\gamma} \quad \dots (1)$

donde la viscosidad, μ , es el coeficiente de proporcionalidad. En general μ no es una constante, sino que depende de un conjunto de variables. Estas variables se pueden dividir en externas e internas.

Las variables externas son independientes - de la naturaleza del fluido y son:

- Presión (P)
- Temperatura (T)
- Velocidad de deformación $(\dot{\gamma})$.

Las variables internas son dependientes --- de la naturaleza del fluido y son:

- Concentración de algún o algunos componentes (x_i) .
- Tamaño promedio y distribución de tamaños - de moléculas o partículas que constituyen - o se encuentran en el fluido $(\phi, \sigma, \text{respectivamente})$.

- Forma y orientación de las partículas o moléculas (F, OR, respectivamente).

Es evidente que si alguna(s) variable(s) depende(n) del tiempo y/o la posición, entonces μ dependerá de estas variables. Lo anterior se puede escribir así:

$$\mu = \mu (P(X,t), T(X,t), \dot{\gamma}^i(X,t), x_i(X,t), \sigma(X,t), \phi(X,t), F(X,t), OR(X,t)).$$

donde:

X = vector de posición medida desde algún sistema de referencia.

t = tiempo.

Se ha observado, que para muchos fluídos, - la viscosidad depende de sólo algunas variables.-

En base a lo anterior se da la siguiente clasificación de los fluídos:

1.1 Fluídos newtonianos:

La viscosidad no es función de la velocidad de deformación, independientemente de que sea o no, función de las demás variables. Ejemplos: - agua, disoluciones acuosas saturadas de sales iónicas, algunos aceites, y en general líquidos moleculares de baja masa molecular.

1.2 Fluídos no-newtonianos:

La viscosidad si es función de la velocidad de deformación, independientemente de que sea o no, función de las demás variables. Dentro de los no-newtonianos tenemos la siguiente clasificación:

1.2.1 Pseudoplásticos: la viscosidad y la rapidez de corte guardan una relación inversa --
($\partial\mu/\partial\dot{\gamma} < 0$).

Ejemplos: suspensiones de arcilla a determinadas velocidades de deformación (figura 8), polibutileno en decalina a 25°C, cal en agua, na-

palm en keroseno, pasta de papel en agua, cemento en agua.

1.2.2 Dilatantes: la viscosidad y la rapidez de corte (también llamada velocidad de deformación) guardan una relación directa ($\frac{\partial \mu}{\partial \dot{\gamma}} > 0$).

Ejemplos: suspensiones de arcilla a determinadas velocidades de deformación (figura 8), -- suspensiones concentradas de TiO_2 .

La clasificación anterior no toma en cuenta el tiempo como variable.

A continuación se da una clasificación, con siderando al tiempo como única variable.

1.2.3 Tixotrópicos: la viscosidad varía - en forma inversa con el tiempo ($\frac{\partial \mu}{\partial t} < 0$).

Ejemplos: grasas, pinturas, tintas, mayone sa, catsup, pasta de cemento.

1.2.4 Antitixotrópicos:⁶ la viscosidad -
varía en forma directa con el tiempo ($\partial\mu/\partial t > 0$).

Tanto a los fluídos como a los sólidos cuyas variables internas dependan del tiempo, se les llama fluídos o sólidos de Boltzmann, respectivamente.

Las relaciones funcionales entre la viscosidad y las variables mencionadas, se han obtenido, esencialmente todas, en forma experimental y la manera en que se acostumbra dar esta relación, es mediante funciones implícitas usando la expresión (1). Algunos ejemplos de estas relaciones son: las ecuaciones de Eyring, Ellis, Reiner-Phillipoff, Ostwald-deWaele (modelo de la ley de la potencia), etc.; todos estos modelos matemáticos se pueden encontrar en la literatura -

6/ La mayoría de los autores usan, impropriamente el término de reopexia para designar a los materiales antitixotrópicos. La reopexia es el fenómeno que ocurre en un material tixotrópico al desaparecer la velocidad de deformación.

(1,7,6). Los modelos anteriores están escritos - para un sistema de flujo unidireccional en donde, si tenemos coordenadas cartesianas $\dot{\gamma} = dv_x/dy$; - sin embargo, estos resultados se pueden generalizar para patrones de flujo más complejos (1).

FLUIDO AVISCOSO:

Como su nombre lo indica, es un fluido con viscosidad nula, es decir, no presenta resistencia al deformarse por corte.

Modelo mecánico: consiste en el mismo dispositivo que para el caso anterior, excepto por el pistón, el cual en este caso no existe.

Modelo matemático: simplemente es $\mu = 0$.

SOLIDO ELASTICO:

En éstos, existe una relación entre las tensiones aplicadas y el grado de deformación del -

cuerpo.

Modelo mecánico: consiste en un resorte (figura-
4).

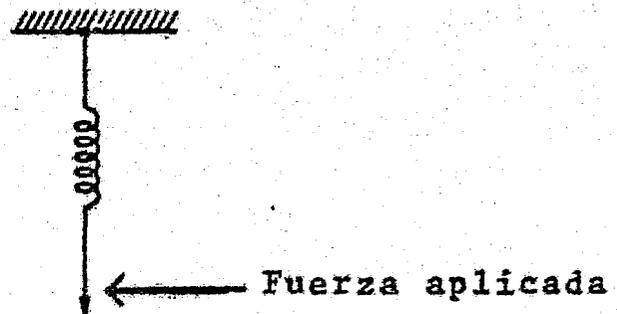


Figura 4. Modelo mecánico para un sólido elástico (7).

Modelo matemático: llamando τ a la tensión de corte y γ a la deformación, podemos establecer:

la proporción: $\tau \propto \gamma$

o la igualdad: $\tau = G\gamma \quad \dots (2)$

donde el módulo de rigidez, G , es el coeficiente de proporcionalidad.

Al igual que la viscosidad, el módulo de rigidez no es constante, sino que depende de un conjunto de variables. Las variables son las mismas que en el caso de la viscosidad excepto por δ^i siendo ahora δ^N . Lo anterior se puede escribir como:

$$G = G(P(X,t), T(X,t), \delta^N(X,t), x_i(X,t), \phi(X,t), \sigma(X,t), F(X,t), OR(X,t)).$$

donde σ y ϕ son parámetros que definen la distribución y tamaño medio de los granos u objetos similares que constituyen al sólido, respectivamente.

F y OR se refieren a la forma y orientación de dichos granos u objetos.

La relación entre G y sus variables puede determinarse experimentalmente.

Cabe hacer notar que, tanto la relación de

la viscosidad con sus variables como la del módulo de rigidez G , con las suyas, se establece no sólo considerando "la mejor función" que se ajusta a los datos experimentales, sino que tiene que sa - tisfacer los requerimientos de conservación de ma - sa, cantidad de movimiento y energía (7).

SOLIDO RIGIDO:

Es todo aquél cuerpo al que no se le puede deformar.

Modelo mecánico: se puede considerar igual a un resorte infinitamente rígido.

Modelo matemático: Es $G \rightarrow \infty$.

Esta idealización sobre el comportamiento de la materia resulta útil al resolver problemas de mecánica clásica (problemas de rotación de un cuerpo rígido, deslizamiento sobre un plano incli - nado, estructuras, etc.).

De lo anterior, puede verse que sólo existen 2 comportamientos puros fundamentales: fluido y sólido.

FLUIDO VISCOELASTICO:

Por ser fluido, se debe deformar, al aplicarle cualquier tensión de corte, a una cierta velocidad. Asimismo, podemos asociarle características elásticas.

Modelo mecánico: consiste en un arreglo de los elementos elástico (resorte) y viscoso, anteriormente presentados, en serie (figura 5).

Con la ayuda de este modelo notamos lo siguiente:

- a) Al aplicar una tensión, el sistema se deforma (el resorte se elonga) pero al pasar el tiempo, el sistema libera las tensiones (el pistón y el resorte recuperan su forma ori-

ginal). Nótese que el sistema queda deformado pero libre de tensiones. A este fenómeno se le llama relajación.

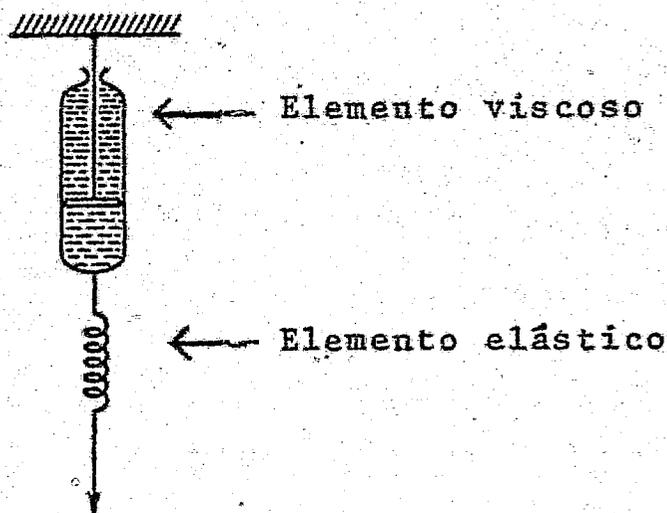


Figura 5. Modelo mecánico para un fluido viscoelástico (7).

- b) Si aplicamos una tensión, deformando al sistema, y se suprime dicha tensión antes de que el sistema libere la tensión interna, el resultado es una contracción total del sistema (el resorte tiende a recuperar su

forma original, y mientras lo hace, jala -
al pistón). A este fenómeno se le llama -
contracción.

Un fluido típico que presenta características viscoelásticas es la carboximetilcelulosa -
(CMC).

Modelos matemáticos: para encontrar la relación entre los estados de tensiones, τ , y el de deformaciones γ , y el de velocidades de deformación, $\dot{\gamma}$, considérese lo siguiente:

En base al modelo mecánico, se puede establicer que la deformación total del sistema estará dado por la suma de las deformaciones del resorte (elástica) y del elemento viscoso (viscosa) o sea:

$$\gamma_T = \gamma_E + \gamma_V \quad \dots (3)$$

T = total, E = elástica, V = viscosa.

Para el resorte, tenemos que:

$$\tau_E = G \gamma_E \quad \dots (2)$$

Para el elemento viscoso se tiene:

$$\tau_V = \mu \dot{\gamma}_V \quad \dots (1)$$

derivando, con respecto al tiempo, la ecuación -
(3) se tiene:

$$\dot{\gamma}_T = \dot{\gamma}_E + \dot{\gamma}_V \quad \dots (4)$$

derivando, con respecto al tiempo, la ecuación -
(2) se tiene:

$$\dot{\tau}_E = G \dot{\gamma}_E \quad \dots (5)$$

donde $G \neq G(t)$.

Sustituyendo, en la ecuación (4), los correspon--
dientes valores de velocidades de deformación, se
tiene:

$$\dot{\gamma}_T = \frac{\dot{\tau}_E}{G} + \frac{\tau_V}{\mu} \quad \dots (6)$$

que es la ecuación representativa del modelo de Maxwell.

Se puede considerar la dependencia de G y μ con las variables anteriormente citadas y obtener una expresión, experimental, para cada material.

Algunos ejemplos de materiales que presentan este comportamiento son: pastas dentríficas, soluciones de CMC, suspensiones de arcillas, suspensiones de cemento, "soluciones" poliméricas.

SOLIDOS ELASTOVISCOSOS:

Por ser sólido, debe existir alguna relación entre el grado de deformación del cuerpo y las tensiones aplicadas. La relación anterior presenta características de viscosidad (es decir, debe haber alguna relación entre la velocidad de deformación y la tensión de corte).

Modelo mecánico: consiste en un arreglo, de los elementos elástico y viscoso, en paralelo (Figura 6).

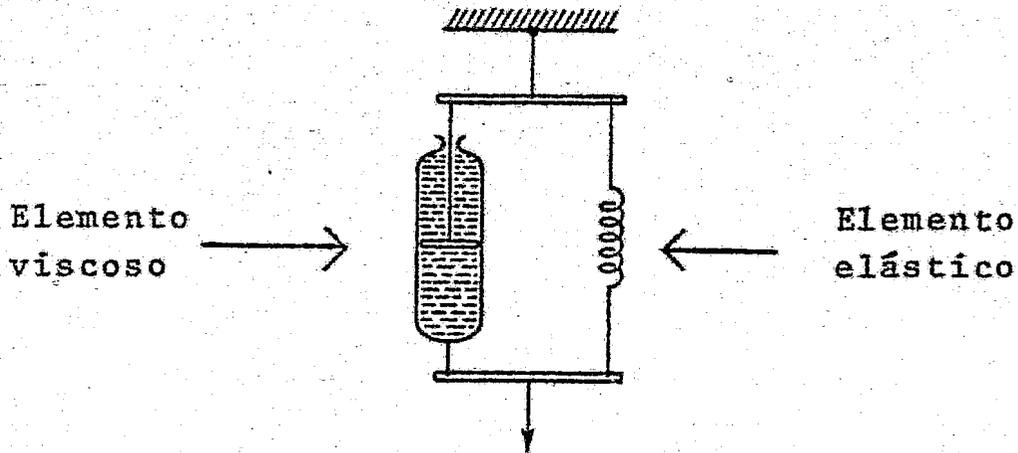


Figura 6. Modelo mecánico para un sólido elasto-viscoso (7).

El modelo anterior, permite apreciar el fenómeno de fluencia lenta. Al aplicar una fuerza al sistema, éste se deforma lenta o retardadamente (por acción del elemento viscoso); al suprimir la fuerza externa, la recuperación del sistema se verifica de la misma manera.

Modelo matemático: para encontrar la forma general de la ecuación constitutiva, se puede utilizar el modelo mecánico anteriormente expuesto; en él, se observa que la fuerza total aplicada es igual a la suma de las fuerzas de los elementos elástico y viscoso (ya que tenemos un arreglo en paralelo). Si se considera la fuerza por unidad de área (tensión), se puede escribir lo siguiente:

$$\tau_T = \tau_E + \tau_V \quad \dots (7)$$

sustituyendo las ecuaciones (1) y (2) en la ecuación (7) se tiene:

$$\tau_T = G \gamma_E + \mu \dot{\gamma}_V \quad \dots (8)$$

que es el modelo de Voight para sólidos elastoviscosos.

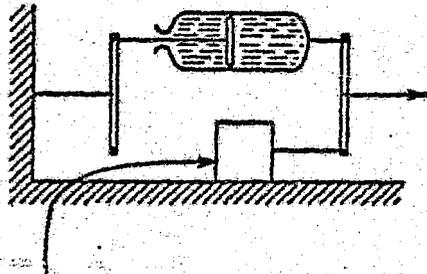
Nuevamente, los coeficientes G y μ son función de las variables ya citadas.

Como ejemplos de materiales que exhiben este comportamiento se tienen: suspensiones de arcilla de más de 60% sólidos, pastas acuosas de cemento a más de 60% en masa de sólidos.

PLASTICOS DE BINGHAM:

Tal como se muestra en la figura 2, son materiales que presentan un comportamiento resultante entre el fluido puro y el sólido elástico. --- Existe una tensión de fluencia después de la cual el material se deforma como un fluido, y la velocidad de deformación es nula a valores menores -- que esa tensión.

Modelo mecánico: consiste en el arreglo de un -- elemento viscoso y un bloque sobre una superficie en paralelo (figura 7).



es necesario aplicar una fuerza mínima para desplazar al sistema.

Figura 7. Modelo mecánico para un plástico de Bingham.

Modelo matemático: nótese que la única diferencia, con respecto a los fluidos puros, es la tensión de fluencia, τ_0 , por lo que sólo se debe introducir ésta en la ecuación (1), obteniendo así el modelo fenomenológico para los plásticos de Bingham.

$$\tau_v = \mu \dot{\gamma}_v + \tau_0 \quad \dots (9)$$

válida si y sólo si $\tau_v > \tau_0$

$$\dot{\gamma}_v = 0$$

válida si y sólo si $\tau_v \leq \tau_0$.

τ_0 es función, como en el caso de G , de un -- conjunto de variables.

Las pinturas presentan este tipo de comportamiento, así como las suspensiones de caolines a concentraciones entre 20 y 60% en masa aproximadamente, y las suspensiones de combustibles nucleares (UO_2 , U_3O_8 , $UO_3 \cdot H_2O$ y ThO_2) en agua pesada.

Una vez establecido el cuadro general de la reología, se está en posición de decir lo que se entiende por un fluido no-newtoniano.

El término, fluido no newtoniano, comprende, además, de los fluidos puramente viscosos mencionados anteriormente, a los fluidos viscoelásticos y a los plásticos de Bingham. Lo anterior se resume en el cuadro siguiente:

FLUIDOS NO-NEWTONIANOS	Pseudoplásticos	Fluídos puros
	Dilatantes	
	Tixotrópicos	
	Antitixotrópicos	
	Viscoelásticos	
	Plásticos de Bingham	

Con ésto, se ha ubicado el comportamiento reológico de las suspensiones de arcilla.

2. EL MODELO DE LA LEY DE LA POTENCIA (Ostwald -De-Waele).

Es una práctica común (1,9) aplicar el modelo de la ley de la potencia a fluídos no-newtonianos, a pesar de que dicho modelo ha sido concebido para fluídos puros en estado estable. Lo anterior simplifica el problema de caracterizar reológicamente a los materiales aunque origine un cierto error por tal suposición; este error dependerá de qué tanto carácter viscoelástico, elastoviscoso y/o plástico de Bingham tenga el -

material.

El modelo de la ley de la potencia, establece una relación entre los estados de tensión y de formación. La forma generalizada⁷ de este modelo puede consultarse en la literatura (1); la forma particular de esta ecuación, que es la que nos interesa⁸ es:

$$\tau = K |\dot{\gamma}|^n \quad \dots (10)$$

Siendo τ la tensión de corte, $\dot{\gamma}$ la velocidad de deformación; K y n son constantes que se determinan, experimentalmente. A K se le llama índice de consistencia, y n mide la desviación con respecto al comportamiento newtoniano --

7/ Por generalizada, entendemos, que hay tensiones y deformaciones en las 3 direcciones; por particular, entendemos, que hay tensiones y deformaciones en menos de 3 direcciones.

8/ Nos interesa porque entre menos componentes tengan los estados de tensiones y deformaciones, más fácil será medirlos; de hecho, la consideración anterior es la base para los aparatos que miden dichas variables.

si n es menor que 1 se tiene un fluido pseudoplástico, si es mayor que 1 se tiene un fluido dilatante y si es 1 se tiene un fluido newtoniano.

Para determinar K y n se necesita algún aparato (viscosímetro) que permite medir τ en función de $\dot{\gamma}$, o viceversa. Los valores de K y n que mejor se ajusten a dichas parejas de datos experimentales, serán los parámetros reológicos del material. Al obtener K y n se ha conseguido la relación funcional entre los estados de tensión y velocidad de deformación ya que la ecuación generalizada del modelo de la ley de la potencia también depende, únicamente de K y n .

En resumen, obtener n y K para un fluido no newtoniano, es determinar sus propiedades reológicas.

COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE SUSPENSIONES DE ARCILLAS

Una vez conocido el material (capítulo I) - y los modelos reológicos (capítulo II), estamos - en posición de establecer el comportamiento reol^ógico de las suspensiones de arcillas.

Las suspensiones de arcilla son fluídos no-newtonianos cuya reología puede alterarse debido a las siguientes variables:

Presión: la presión modifica la densidad - de los materiales, alterando las propiedades reológicas en, la misma media, aproximadamente. Para gases, éste es un factor importante, sobre todo a presiones altas (mayores que 1 MPa). La dependencia de la viscosidad con la presión, para - tales casos, ha sido evaluada anteriormente (1).- Para líquidos, el efecto de la presión sobre la - densidad es menor, por lo que para este trabajo -

(suspensiones) se puede despreciar el efecto de la presión.

Temperatura: la temperatura afecta considerablemente a la viscosidad, tanto de gases como de líquidos. Para el caso de suspensiones, - el efecto de la temperatura sobre sus propiedades reológicas es similar al efecto de la temperatura sobre las propiedades reológicas de la fase líquida (7,9).

Velocidad de deformación: la velocidad con la que se deforma a un cuerpo, no debe producir cambios en la viscosidad de materiales estrictamente homogéneos. Para el caso de suspensiones arcillosas, la velocidad de deformación afecta a la orientación de las partículas y a la interferencia mecánica mutua.

Concentración de algún componente: en una suspensión de arcilla se pueden considerar a los siguientes componentes:

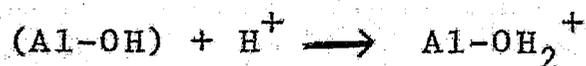
- a) Arcilla. Su concentración está dada en -
por ciento en masa.
- b) Iones H^+ . Su concentración se expresa co-
mo el pH.
- c) Otros iones. Su concentración está dada -
en cualquier unidad de concentración.
- d) Polímeros. Su concentración está dada en-
cualquier unidad de concentración.

Se consideran estos componentes porque su-
efecto ha sido estudiado anteriormente (10).

La concentración de arcilla en la suspen-
sión altera las propiedades reológicas de la sus-
pensión porque al aumentar ésta, la energía nece-
saria para deformar la suspensión también se in-
crementa, lo cual se traduce en un incremento en
la viscosidad.

El efecto de los iones H^+ tiene que ver con la naturaleza eléctrica de la interfase arcilla-agua. La caolinita consiste de capas cristalinas, alternadas, de átomos Si-O y de Al-O (capítulo I). El efecto del pH sobre la viscosidad se puede resumir de la siguiente forma:

A valores ácidos de pH, las partículas de caolinita quedan bicargadas, es decir poseen tanto zonas positivas como negativas, presentándose las reacciones posibles siguientes (10):



La reacción del (Si-OH) con H^+ no ha sido propuesta formalmente pero, en base a la experimentación (10) se supone que se obtiene una superficie cargada negativamente. Como cada partícula de arcilla tiene expuestas, tanto zonas de (Al-OH) como de (Si-OH), entonces se presentan partículas bicargadas. El efecto anterior provoca que las partículas se aglomeren, de modo que las

zonas positivas de unas estén en contacto con - las negativas de otras. Al fenómeno de aglomeración se le llama floculación.

A valores alcalinos de pH, las partículas de caolinita quedan monocargadas, siendo las posibles reacciones las siguientes:



Nótese que ambas dan por resultado una superficie negativa. Esta situación provoca repulsión entre las partículas, favoreciendo el mantenerse en suspensión. Al fenómeno anterior se le llama defloculación.

Efecto de otros iones: si consideramos -- a una suspensión defloculada, la fuerza neta entre las partículas es la resultante de dos:

- 1) Una fuerza de atracción, proporcional a d^{-7} , debida a la atracción London-van der Waals.
- 2) Una fuerza de repulsión, proporcional a d^{-2} , debida a la repulsión entre superficies del mismo signo eléctrico.

Existe una distancia, d_0 , en la cual ambas fuerzas se equilibran, pero a distancias menores la fuerza de atracción domina, provocandose la floculación. Si adicionamos algún electrolito, por ejemplo NaCl, el efecto que estos iones tendrán será el de incrementar la constante dieléctrica aparente de la fase líquida, reduciendo el valor de la fuerza de repulsión, ésto trae como consecuencia, una floculación.

Los polímeros, tales como el poliacrilato de sodio o polifosfatos de sodio de baja masa molecular, se disocian en el agua para producir un anión de cadena corta. El anión es fuertemente adsorbido por una zona positiva en la partícula

de caolín. La adsorción es tan enérgica que se considera una reacción química, de tal modo que la carga de caolín no sólo se neutraliza, sino que se invierte. El resultado de todo lo anterior es una defloculación. Por otro lado, los polímeros de alta masa molecular tienden a formar uniones o puentes entre las partículas, aglomerándolas y provocando floculación.

El comportamiento no-newtoniano de las suspensiones de arcilla se puede resumir en la siguiente forma:

1. Pseudoplasticidad: las suspensiones de arcilla presentan este comportamiento en algunos intervalos de velocidad de deformación (intervalos I y III, figura 8). Para el intervalo I la explicación es la siguiente, según Walters (10):

En una suspensión se tienen partículas cargadas eléctricamente, las cuales se rodean de una capa (o más) de iones de signo opuesto provenientes

tes del agua. Esta capa dificulta el movimiento de las partículas, pero al aumentar la velocidad de deformación, la capa es eliminada parcialmente, favoreciendo el movimiento de las partículas y ocasionando que la viscosidad disminuya.

En el intervalo III, figura 8, también se observa pseudoplasticidad, la cual se explica diciendo que ocurre fractura de las prominencias de las partículas irregulares, disminuyendo así la interferencia mutua y por ende, disminuye la viscosidad.

2. Dilatancia: al igual que en el caso de la pseudoplasticidad, existen dos zonas de velocidades de deformación en donde ocurre. En la zona II, figura 8, se presenta dilatancia debido, quizá, a la interferencia que las partículas ejercen mutuamente, es decir, al aumentar la rapidez de deformación aumenta el movimiento caótico de las partículas, por lo que se incrementa la viscosidad.

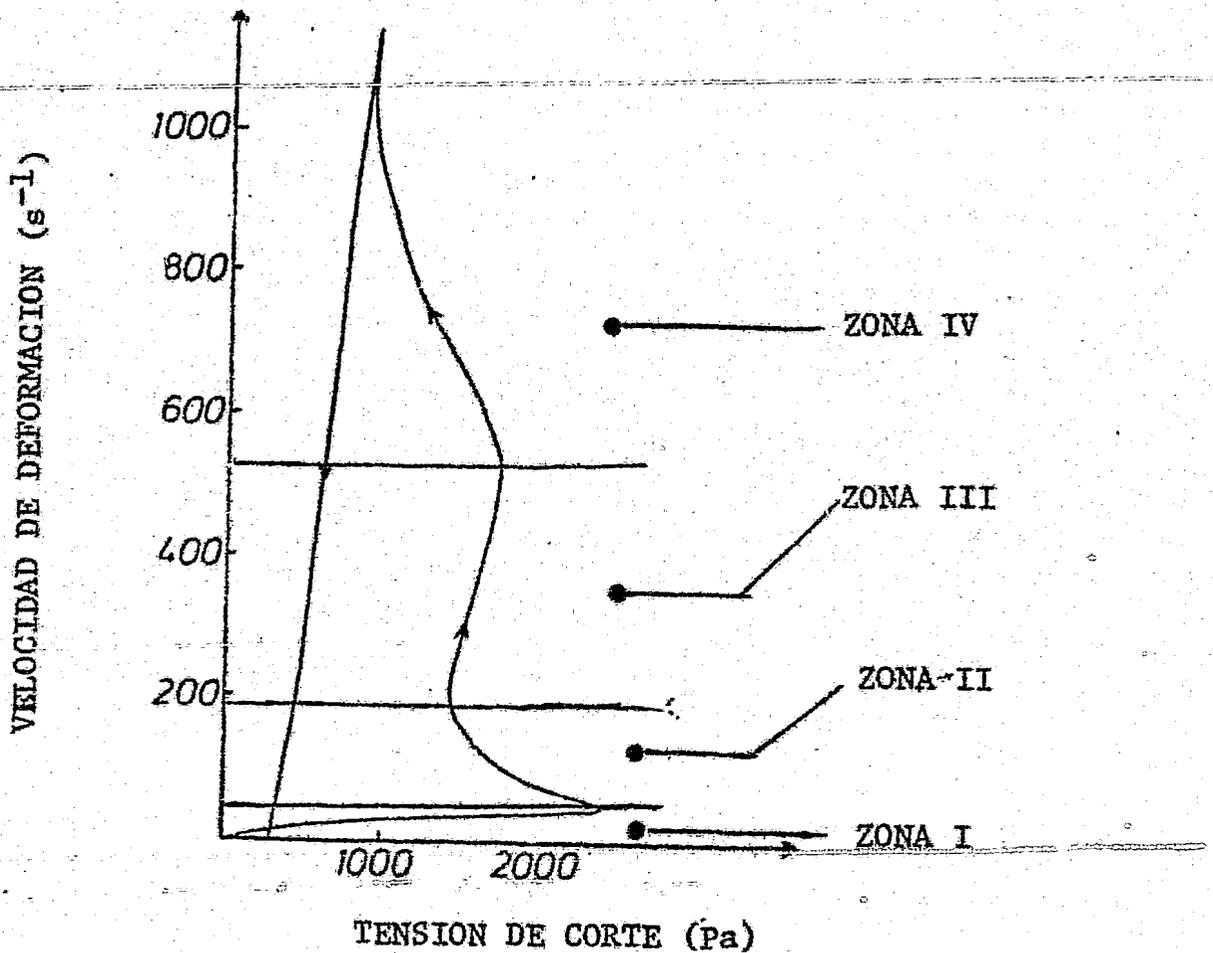


Figura 8. Curva de flujo, obtenida con un aparato Ferranti-Shirley de una suspensión de arcilla con 40% en masa de sólidos y 500 ppm de floculante polimérico (10).

La zona IV, figura 8, se justifica diciendo que los esfuerzos cortantes "empacan" a las partículas por lo que forman agregados que se interfieren mutuamente. Este efecto es similar al que ejercen partículas no aglomeradas.

3. Tixotropía: la disminución de la viscosidad con el tiempo se explica en términos del lapso requerido para modificar la estructura de la suspensión (orientación de las partículas, distancia entre partículas). Al orientarse las partículas al arreglo de menor resistencia al flujo, la viscosidad baja.

Cuando las partículas se alejan, unas de otras, la fuerza de atracción es dominada por la repulsión, por lo que la viscosidad disminuye.

El cambio en la estructura existe sólo cuando el material es sometido súbitamente a una velocidad de deformación. Cuando ésta desaparece, el material recupera sus características estructurales iniciales, por lo que se dice que la tixotropía es reversible.

4. Tensión de fluencia: la necesidad de suministrar al fluido una tensión mínima para que empiece a fluir, se debe a que existe un estado -

de atracción entre las partículas, mismo que hay que vencer para provocar el flujo. Lo anterior provoca que las suspensiones se comporten como plásticos de Bingham.

5. Elastoviscosidad: el carácter elastoviscoso que tienen las suspensiones de arcilla, se puede atribuir a agentes externos, tales como polímeros.

Por otro lado, en suspensiones con altos porcentajes de sólidos, se puede observar este carácter en virtud de la poca cantidad de fase líquida.

En suspensiones con tamaños de partícula muy desiguales (polidispersos) se favorece el empaquetamiento entre las partículas, ya que las partículas pequeñas llenan los huecos dejados por las mayores. Lo anterior es una causa posible del comportamiento elastoviscoso.

En general, se puede decir que todo lo que -
provoque floculación en la arcilla, favorecerá -
el comportamiento elastoviscoso de las suspensio-
nes.

V I S C O S I M E T R O S

Los aparatos que sirven para determinar las propiedades reológicas de los materiales se llaman reogonómetros.

Un viscosímetro es un caso particular de reogonómetro, ya que determina la relación entre las tensiones y deformaciones de corte, sin considerar los esfuerzos normales. Por lo anterior, un viscosímetro determina las propiedades reológicas de un fluido puro (reológicamente hablando), únicamente. Si se usa un viscosímetro para determinar las propiedades reológicas de un pseudofluido, se tendrá un cierto error en los resultados debido a la existencia de tensiones normales; dicho error, es, todavía, aceptable para aplicaciones ingenieriles.

1. VISCOSIMETROS DE FLUJO TELESCOPICO

El término flujo telescópico, se refiere a-

que el fluido se mueve en capas cilíndricas co-
axiales (figura 9).

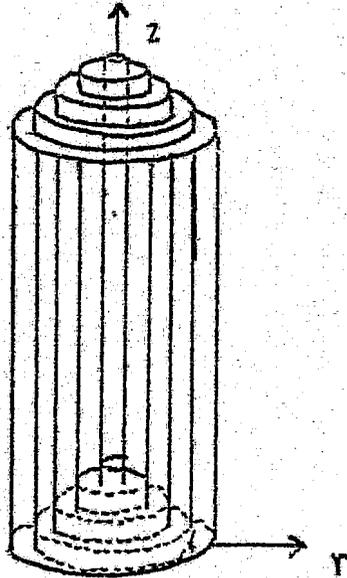


Figura 9. Flujo telescópico (17).

Se pueden citar 2 aparatos que utilizan --
el movimiento unidireccional mencionado, para me
dir las propiedades reológicas de los fluidos; -
ellos son:

- viscosímetro de tubo capilar
- viscosímetro de tubo.

Viscosímetro de tubo capilar: la figura -

10 muestra, en forma muy esquemática, las características esenciales de estos aparatos (los detalles se encuentran en la bibliografía) (45 en 8).

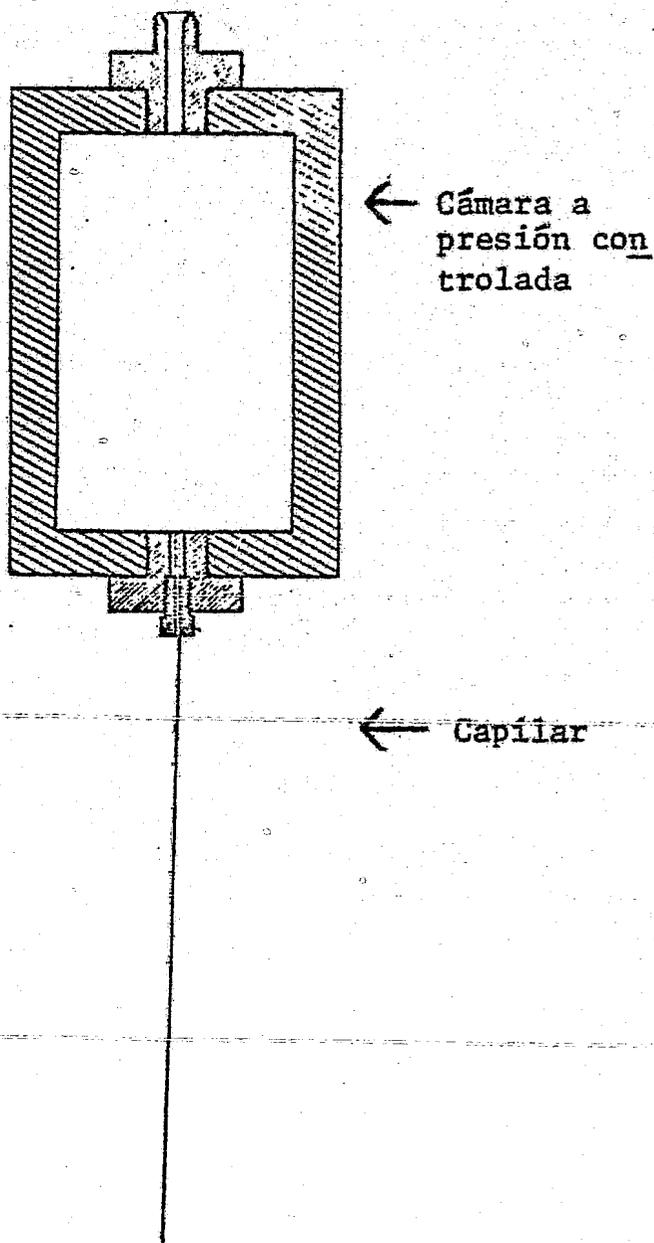


Figura 10. Viscosímetro de tubo capilar (8).

El fluido bajo estudio es almacenado en una cámara desde la cual se descarga a través de un tubo capilar, mediante la acción de presión, producida ya sea por un gas, gravedad, un pistón o por succión a la salida del tubo.

Las variables que se pueden medir son:

- a) La diferencia de presiones (desde el nivel en el depósito, hasta la salida del tubo) y
- b) El flujo volumétrico o másico. A partir de estas variables, se puede obtener la viscosidad o propiedades reológicas del fluido--
(8).

Una de las dificultades principales de estos viscosímetros, es la corrección de la diferencia de presiones, en la cual hay que considerar:

- I) La corrección por la columna de líquido sobre el tubo,

II) La corrección por los efectos de la energía cinética, y

III) Las pérdidas de energía o caída de presión a la entrada del tubo.

La primera corrección es directa, pero existe duda acerca de las otras dos.

La corrección (III) se propone igual a ---
($1.5 \rho u_m^2 / g$) donde ρ es la densidad, g es la aceleración de la gravedad y u_m es la velocidad-promedio del fluido.

Para evaluar (III) se han propuesto 2 caminos:

El primero es utilizar un fluido newtoniano de viscosidad conocida, y el segundo es usar capilares de diferentes longitudes, obteniendo diferentes caídas de presión; se extrapola a longitud cero y se evalúa, gráficamente, la caída de -

presión. Esta caída de presión, corresponde a los efectos de la entrada al capilar.

El viscosímetro de tubo utiliza los mismos principios que el de tubo capilar, pero está colocado en forma horizontal. En este sistema no se presentan las correcciones a la caída de presión.

2. VISCOSIMETROS DE FLUJO CIRCULAR

El término, flujo circular, significa que el fluido se mueve trazando círculos, no existiendo movimiento en ninguna otra dirección (figura 11).

Como ejemplo se citarán 2 tipos de viscosímetros.

Viscosímetro de Couette: la figura 12 muestra a grosso modo, la configuración de ese viscosímetro. Los detalles se dan en la bibliografía (8).

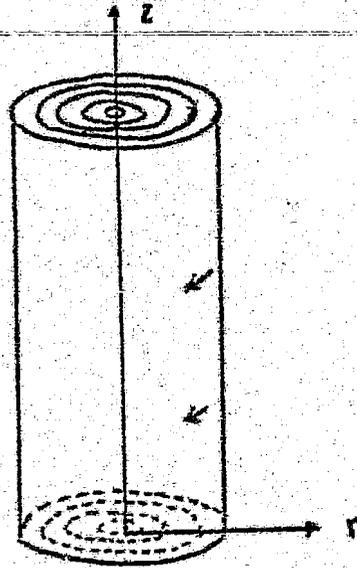


Figura 11. Flujo circular (17).

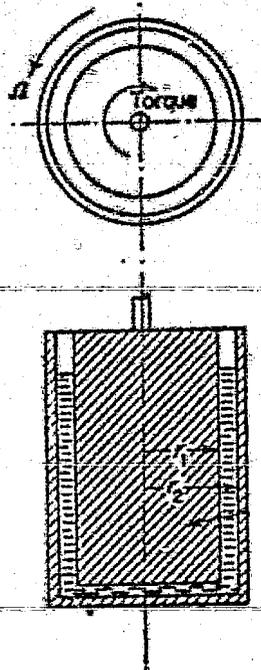


Figura 12. Viscosímetro de Couette (8).

El fluido bajo estudio, se coloca en un recipiente, en donde se sumerge un cilindro de dimensiones conocidas y se hace girar a una cierta-velocidad angular.

Las variables que se pueden medir son:

- a) La velocidad del cilindro
- b) El torque necesario para lograr dicha velocidad.

A partir de estas variables se pueden obtener las propiedades reológicas del material (8).

Una de las principales dificultades de estos viscosímetros es, considerar los efectos de la superficie inferior del cilindro (tapa inferior). Estos efectos pueden ser evaluados de dos maneras: la primera, es realizando 2 experimentos cuyas velocidades del cilindro sean iguales; en un experimento se mide el torque estando sumer

gido el cilindro a una cierta altura, y en el ---
otro, se vuelve a medir el torque pero con el ci-
lindro sumergido hasta otra altura. Si la dife -
rencia entre los torques es dividida por la dife -
rencia de las alturas, se obtiene el torque por -
unidad de altura.

La segunda manera, es calcular una "altura-
equivalente" del cilindro, calibrándolo con un -
fluído newtoniano de viscosidad conocida.

Viscosímetro Brookfield: la figura 13 -
muestra, esquemáticamente, este tipo de aparato.

1. Motor síncrono
2. Cubierta del motor
3. Engrane de transmisión
4. Cubierta principal
5. Carátula
6. Resorte
7. Eje pivote
8. Punto pivote

Copa pivote

10. Apuntador no magnético

11. Engranaje.

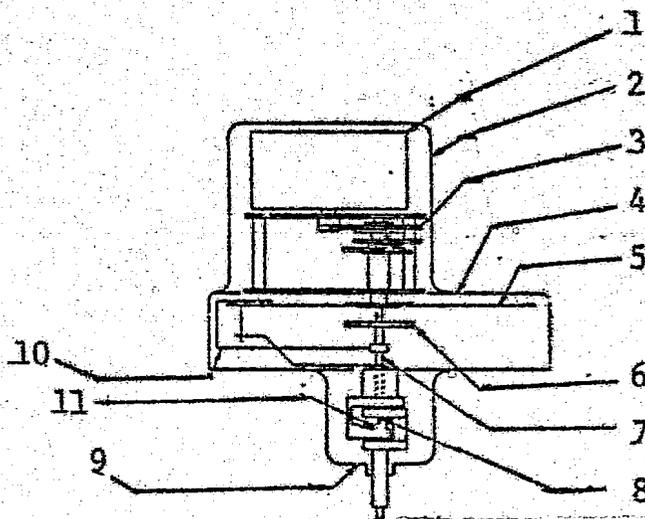


Figura 13. Viscosímetro Brookfield (8).

Al igual que el viscosímetro anterior, se tiene flujo circular; pero en lugar de cilindro se tienen un disco o husillo, estando dicho husillo sumergido en un medio "infinito" ($r \rightarrow \infty$).

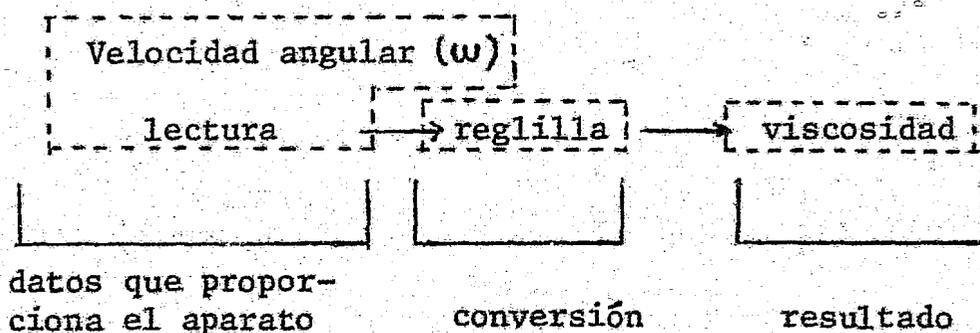
A partir de estos viscosímetros se obtie -

nen los datos siguientes:

- 1) Una lectura, sobre la carátula, que es proporcional al torque y,
- 2) La velocidad angular del husillo.

La obtención de las propiedades reológicas a partir de los datos anteriores es un problema difícil (10, 2 en 11) pero existe, a la fecha, información que facilita considerablemente dicha labor (11).

Este viscosímetro es muy útil para flúidos newtonianos ya que el aparato está calibrado previamente y la información del fabricante al respecto (dada en una reglilla de conversión) es tal, que permite evaluar directamente la viscosidad del fluido. El proceso anterior se resume en el cuadro siguiente:



Para fluidos no-newtonianos, se deben tomar lecturas a varias velocidades angulares. Lo anterior permite evaluar la relación existente entre la viscosidad y la rapidez de deformación (la cual es proporcional a la velocidad angular del husillo).

3. OTROS VISCOSIMETROS

Existen otros viscosímetros que no podrían care dentro de la clasificación mencionada (flujo telescópico y circular). Como ejemplo se citarán los ejemplos siguientes:

Viscosímetro de cono y plato: se representa en la figura 14.

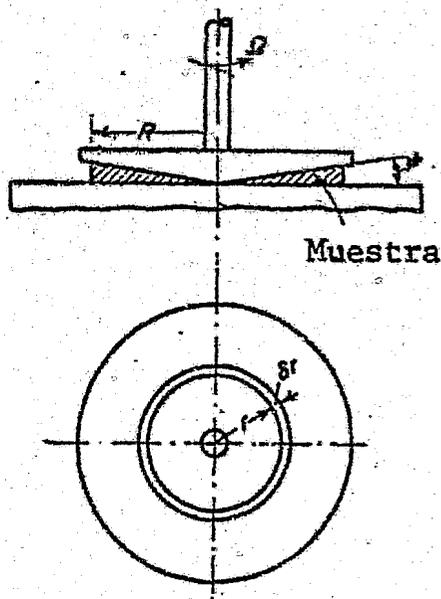


Figura 14. Viscosímetro de cono plato (8).

En este sistema, el fluido bajo estudio es colocado sobre una placa (plato); un cono con su vértice en contacto con la superficie superior -- de una placa, se pone sobre el fluido (el fluido no se derrama por la tensión superficial) y se ha ce girar a una cierta velocidad angular.

Las variables que se pueden medir son:

- 1) La velocidad angular del cono y
- 2) El torque necesario para hacerlo girar.

La relación entre estas variables y las propiedades reológicas del material, se encuentran en la bibliografía (1,8).

Un modelo comercial de un viscosímetro de cono y plato, es el Ferranti-Shirley (figura 15) y tiene la ventaja, con respecto al viscosímetro de tubo capilar y al de Couette, de obtener una velocidad de deformación uniforme.

El volumen de la muestra es menor que 0.5 ml y se puede someter a velocidades de giro del cono entre 1 y 1000 rpm, esto permite obtener información reológica en un amplio intervalo de velocidades de deformación.

Para evitar un aumento considerable en la

temperatura, por efecto de las altas velocidades

de giro del cono, la placa tiene adaptada una chaqueta a través de la cual circula agua, manteniendo la placa a temperatura constante.

1. Husillo del cono
2. Cono
3. Eje motriz
4. Resorte
5. Cubierta
6. Potenciómetro
7. Limpiador para el potenciómetro
8. Anillos deslizantes
9. Anillo deslizante
10. Placa
11. Micrómetro
12. Tuerca
13. Tornillo
14. Motor
15. Engranaje
16. Termopar
17. Chaqueta refrigerante

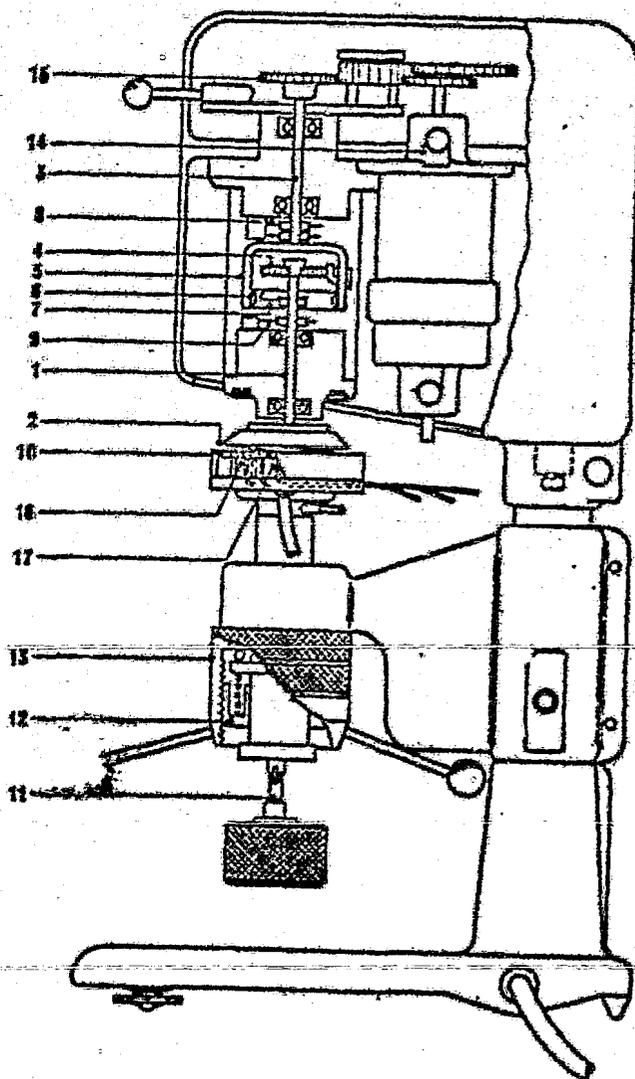


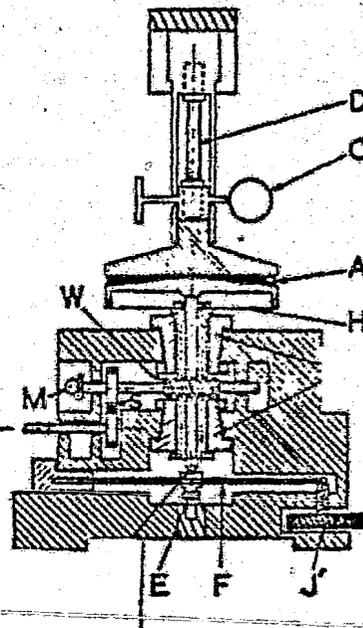
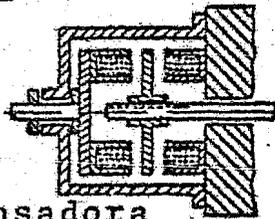
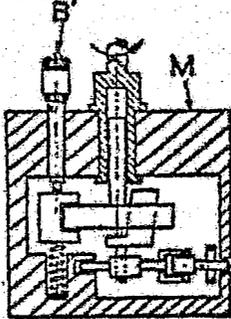
Figura 15. Viscosímetro Ferranti-Shirley - (8).

Reogonómetro Roberts-Weissenberg: este tipo de aparato no entra en la categoría de viscosímetros, ya que no sólo mide la componente tangencial de la tensión a lo largo de líneas de corriente, sino que además mide todas las componentes de la tensión y de la deformación. Por lo tanto, --permite estudiar a materiales que no sean fluídos puros (reológicamente hablando) figura 16.

Existen otros aparatos en la industria, --que dan información específica requerida por el --proceso (10), algunos de estos aparatos son: viscosímetros Gallenkamp, Hércules y Fann, y el viscosímetro que emplea una esfera sumergida.

Actualmente se desarrollan otros viscosímetros, como el de esfera rotatoria (13).

- J': tornillo micrométrico
 A: muestra
 M: controlador de frecuencia
 B': controlador de la amplitud
 W: gusano
 S: ruedas



- C: jaula condensadora
 D: barra de torsión
 E, F: resorte de la jaula condensadora

Figura 16. Reogonómetro Roberts-Weissenberg

APARATOS UTILIZADOS:

Para determinar la viscosidad, se emplea un viscosímetro Brookfield modelo LVF Synchroelectric, de 4 velocidades (6, 12, 30 y 60 rpm) el cual tiene las limitaciones siguientes:

1. Información, del comportamiento reológico del material, sólo en la región de flujo laminar, no debiendo extrapolar esta información a flujo turbulento (10).

2. Se tienen 4 puntos únicamente (las 4 velocidades) por lo que la información experimental sólo podrá darnos una idea aproximada del comportamiento reológico del material.

Para medir el tamaño de partícula, se utilizaron los aparatos siguientes:

- a) Cribadora con tamices de 100, 200 y 250 mallas Tyler.
- b) Contador Coulter (3).

Para controlar el porcentaje de sólidos, se utilizó una balanza de platillos, y una probeta de 100 ml para medir los volúmenes de agua.

La medición del pH, se realizó con ayuda de un potenciómetro Radiometer.

Las condiciones ácidas y alcalinas, en la suspensión, se alcanzaron con disoluciones de HCl y NaOH con concentraciones de 0.1 N cada una.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL:

Para establecerlo, fue necesario recurrir a la literatura y realizar una serie de pruebas preliminares, todo lo cual responde a las preguntas: al determinar las curvas reológicas ¿qué variables hay que considerar (pH, porcentaje de sólidos)

dos, tamaño de partícula)? ¿en qué intervalo, de -
cada variable, se realizarán las pruebas?

Las respuestas son:

- a) Tamaño de partícula: por la literatura --
(10), se sabe que afecta las propiedades -
reológicas, pero su medición resulta imprac-
ticable, ya que las partículas' (granos aglo-
merados), tienen una distribución de tama-
ños que depende del pH, concentración de s_ó-
lidos y movimiento mecánico de la suspen-
sión.

Por las experiencias realizadas en este tra-
bajo, se determinó que la suspensión de arcilla de-
be tener un tamaño de partícula de -200+250 y -
-250+pan Tyler.

La arcilla que no haya pasado dichas mallas
se sedimenta durante los experimentos de medición-
de viscosidad, provocando que ésta, cambie al --

transcurrir dicha sedimentación (figura 17).

Con la ayuda de un contador Coulter, se compararon los tamaños de partícula, de las muestras -200+250 y -250+pan, encontrándose ser muy similares; así que tienen el mismo tamaño de partícula (figura 18). En resumen, se trabajó con un tamaño de partícula aproximadamente constante.

b) Porcentaje de sólidos: por la literatura - (10), se sabe que afecta a las propiedades-reológicas y se puede medir con facilidad.

Por las experiencias realizadas, se determinó que la suspensión debe tener un contenido de - más de 40% de sólidos para que no haya sedimentación y la viscosidad no se altere por este efecto (figura 20).

c) ~~Potencial de hidrógeno pH: por la literatu~~ra (10), se sabe que afecta a las propiedades reológicas y se puede medir fácilmente.

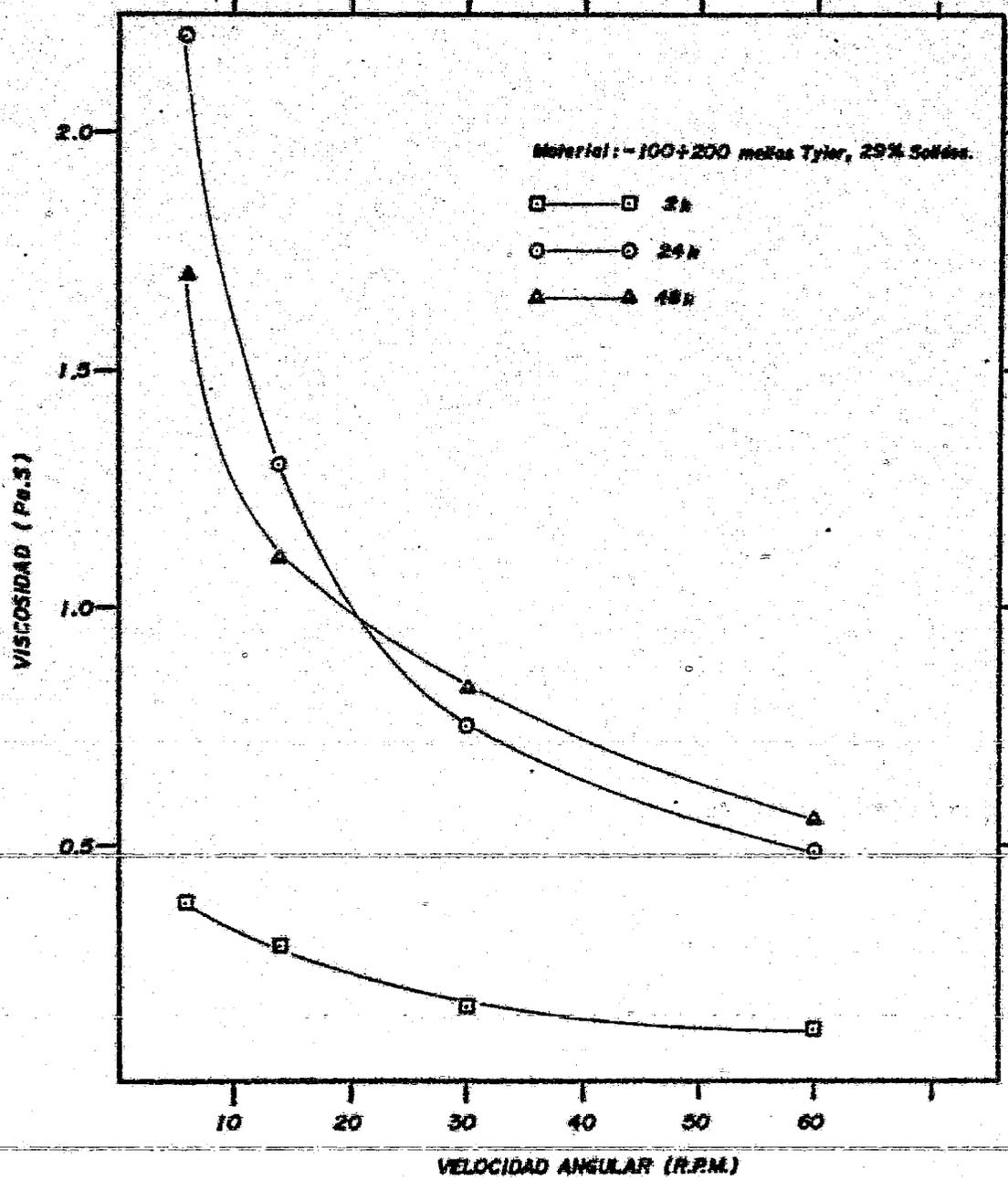


FIG. 17 EFECTO DE LA SEDIMENTACION SOBRE LA VISCOSIDAD



COULTER COUNTER® Model T & T_A Worksheet

SAMPLE carlín		DISPERSANT no-iónico						
ELECTROLYTE isotón	SERIAL	Aper. Dia. 70µm	Ser. No.	CALIBRATION DATA	Part. Dia.	W	±IA	A
EQUIPMENT T_A II				micronsf.	10, 11	11	1.6	395
ORGANIZATION U.R.A.	DATE enero 1963.							
OPERATOR Andrés A.								

$$k = d \sqrt{\frac{2W}{A}}$$

FOR MODEL T

±IA	1.6		
CALIB. A	100.5		
APERTURE DIA.	70		

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \frac{(W_2 - W_1)}{W_1} \text{ For Model T}$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \frac{(W_2 - W_1)}{W_2} \text{ For Model T}_A$$

SAMPLE DATA

Geometric Mean μ^3	Volume μ^3	Diameter μ	Channel (W)	1	2	3	4	5
.00575	.004091	.188						
.0116	.008181	.250						
.0231	.01636	.315						
.0462	.03272	.397						
.0925	.06545	.500						
.1851	.1309	.630						
.3702	.2618	.784						
.7405	.5236	1.00	1	10.0	6.5	5.4	11.8	15.3
1.481	1.047	1.26	2	6.8	6.2	5.5	8.2	10.4
2.962	2.094	1.59	3	6.4	9.6	11.2	12.5	13.5
5.924	4.189	2.00	4	6.8	10.8	8.8	8.7	10.5
11.85	8.378	2.52	5	4.8	12.0	12.6	5.1	5.6
23.70	16.76	3.17	6	4.6	11.5	9.5	5.4	5.8
47.39	33.51	4.00	7	5.2	5.2	7.0	5.7	6.0
94.78	67.02	5.04	8	5.9	5.2	4.3	5.4	6.0
189.6	134.0	6.35	9	5.6	5.0	4.2	6.6	6.5
379.1	268.1	8.00	10	5.6	4.8	5.6	4.3	5.0
758.3	536.2	10.08	11	5.5	5.1	3.9	3.4	5.2
1516.	1072.	12.7	12	7.0	5.2	4.5	2.6	4.5
3033.	2145.	16.0	13	7.0	5.0	4.5	4.4	4.6
6066.	4289.	20.2	14	4.0	5.1	4.2	1.6	1.7
12.13 x 10 ³	8579.	25.4	15	5.4	2.5	1.2	5.2	0.2
24.27 x 10 ³	17.16 x 10 ³	32.0	16				0.2	
48.54 x 10 ³	34.31 x 10 ³	40.3						
97.18 x 10 ³	68.63 x 10 ³	50.8						

Figura 18. Cuadro de los resultados obtenidos en un contador Coulter, (3). Los números del 1 al 16 indican canales de trabajo, los cuales tienen asociados diferentes tamaños de partícula mediante una calibración. Los números del 1 al 3 son muestras -250 pan Tyler y 4, 5 son muestras -200+250 Tyler. Los números, abajo a la derecha, indican por ciento en volumen.

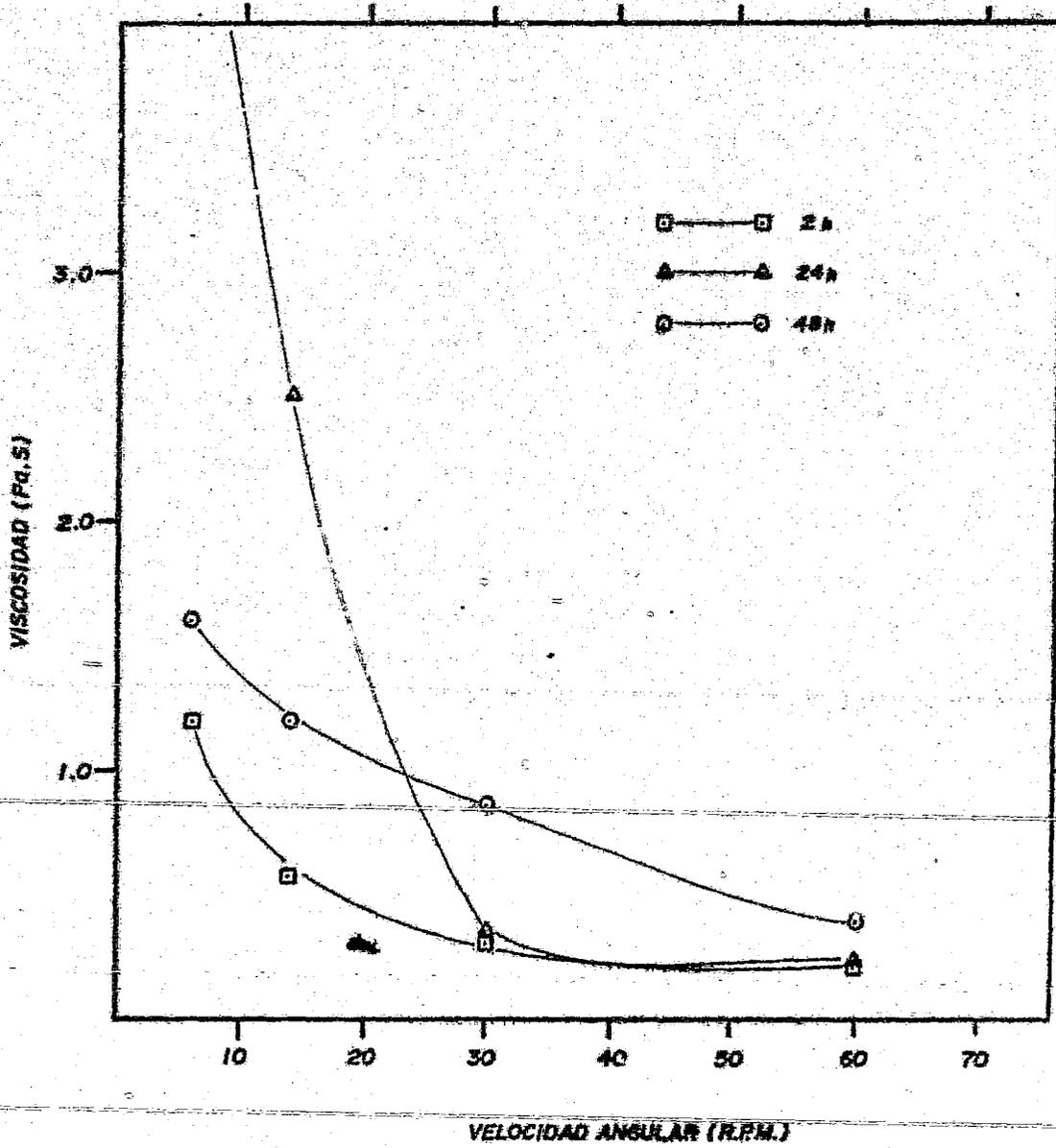


FIG. 19 EFECTO DE LA SEDIMENTACION SOBRE LA VISCOSIDAD. SUSPENSION DE MATERIAL -250 MALLAS A 40% SOLIDOS

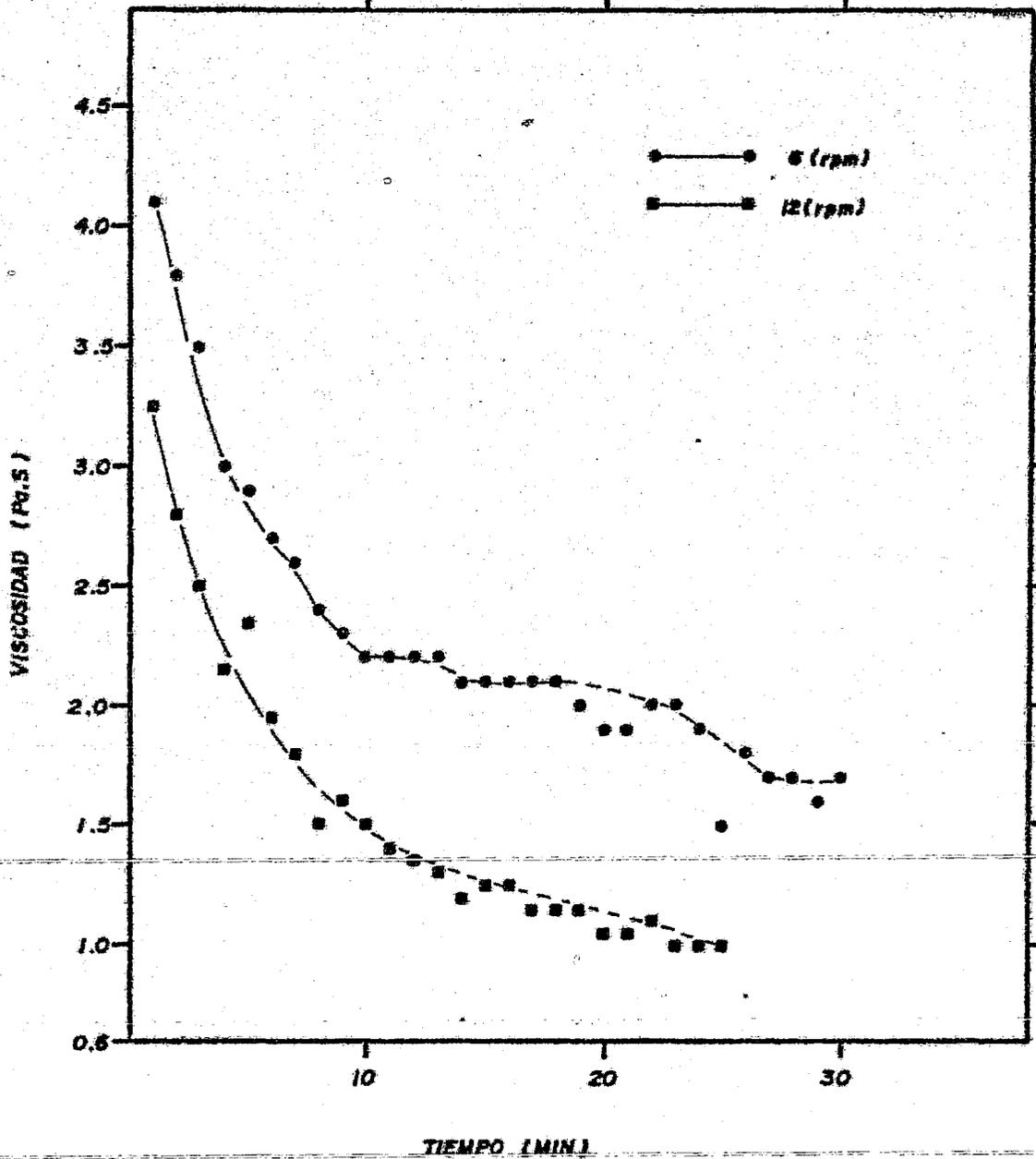


FIG. 20 VISCOSIDAD COMO FUNCION DEL TIEMPO, SUSPENSION CON PH=6 Y 55% DE SOLIDOS

El intervalo considerado fue desde 1 hasta 13, por ser valores comunes.

d) Tiempo: por la literatura (10), se sabe que afecta a las propiedades reológicas y es de fácil medición.

En el presente trabajo se descartó tal variable, porque no forma parte de los objetivos del mismo, considerando estado estable. Se determinó experimentalmente, el tiempo necesario (30 minutos) para que se estabilizara la lectura (figura 20).

Dados los valores de tamaño de partícula, porcentaje de sólidos y pH, se determina la curva de flujo (τ vs $\dot{\gamma}$) a temperatura ambiente (19-22°C) y presión atmosférica (8×10^4 Pa).

Se obtuvieron 21 suspensiones al combinar 3 valores de porcentaje de sólidos con 7 valores de pH, de la manera siguiente:

a) Suspensiones con 55% en masa de sólidos y pH:

$x_1 = 55\%$	$\text{pH}_1 = 1.6$
	$\text{pH}_2 = 5.2$
	$\text{pH}_3 = 5.7$
	$\text{pH}_4 = 9.6$
	$\text{pH}_5 = 10.4$
	$\text{pH}_6 = 11.5$
	$\text{pH}_7 = 12.4$

b) Suspensiones con 57% masa de sólidos y pH:

$x_2 = 57\%$	$\text{pH}_1 = 1.7$
	$\text{pH}_2 = 2.4$
	$\text{pH}_3 = 4.7$
	$\text{pH}_4 = 5.7$
	$\text{pH}_5 = 8.7$
	$\text{pH}_6 = 9.4$
	$\text{pH}_7 = 11.0$
	$\text{pH}_8 = 12.4$

c) Suspensiones con 60% masa de sólidos y pH:

$$X_3 = 60\%$$

$$pH_1 = 1.7$$

$$pH_2 = 5.1$$

$$pH_3 = 5.2$$

$$pH_4 = 8.6$$

$$pH_5 = 9.1$$

$$pH_6 = 10.6$$

El procedimiento experimental, para obtener las propiedades reológicas de las suspensiones anteriores, se resume a continuación:

1. La materia prima, sin algún tratamiento, se somete a molienda (molino de discos) y tamizado. Se separa el material que se encuentra entre los tamices -200+pan Tyler, y se trabaja con él.
2. Las suspensiones se preparan adicionando -- (140-X) ml de agua a Y gramos de arcilla, - en un vaso de precipitados de 250 ml. Los valores de Y son los siguientes:

55% ; Y = 171 g.

57% ; Y = 186 g.

60% ; Y = 210 g.

Los valores de X, que ajustan al pH, son del orden de 1 a 10 ml., dependiendo del pH deseado en la suspensión y de la concentración del ácido o de la base utilizada.

3. Se determinan las lecturas en el viscosímetro, a cada velocidad angular del husillo; y se lee, a partir de la reglilla (pág. 66) - la viscosidad.

4. Con los datos (w, μ) se construye la curva reológica (pág. 96).

RESULTADOS EXPERIMENTALES. DISCUSION

A continuación se presentan, en forma tabulada y gráfica, los resultados para cada suspensión.

SUSPENSION I (55%, pH = 1.6)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
	6	7.5, 5.8, 9.3, 4.3,	6.4	1.88	12.
		6.0, 5.2	desv.=1.8		
	12	6.1, 3.2, 6.2, 3.2,	4.6	3.77	17.
		5.8, 3.1.	desv.=1.6		
3	30	2.3, 2.0, 2.7, 1.7,	2.0	9.42	19.
		1.7, 1.8	desv.=0.40		
	60	1.3, 1.3, 1.4, 1.0,	1.2	18.9	23.
		1.1, 1.0	desv.=0.17		

Ecuación reológica: $\tau = 11. \dot{\gamma}^{0.24}$ corr = 0.970

SUSPENSION II (55%, pH = 5.2)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	6	3.5, 5.2, 4.4	4.4	1.88	8.3
			desv.=0.85		
	12	2.1, 2.7, 2.6	2.5	3.77	9.4
			desv.=0.32		

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	30	1.9, 1.3, 1.3	1.5 desv.=0.35	9.42	14.
	60	1.0, 1.0, 0.96	1.0 desv.=0.023	18.9	19.

Ecuación reológica: $\tau = 6.1 \dot{\gamma}^{0.37}$ corr.=0.985

SUSPENSION III (55%, pH = 5.7)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	6	5.0, 6.7, 7.4	6.4 desv.=1.2	1.88	12.
	12	5.0, 8.2, 7.1	6.8 desv.=1.6	3.77	26
4	30	1.9, 1.6, 1.9	1.8 desv.=0.17	9.42	17.
	60	1.1, 1.1, 1.1	1.1	18.9	21.

SUSPENSION IV (55%, pH = 9.6)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
2	6	0.43, 0.58, 0.58	0.53 desv.=0.087	1.88	1.0
	12	0.29, 0.43, 0.44	0.39 desv.=0.084	3.77	1.5
	30	0.16, 0.24, 0.26	0.22 desv.=0.053	9.42	2.1

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
	60	0.11, 0.14, 0.18	0.14 desv.=0.035	18.9	2.6

Ecuación reológica: $\tau = 0.82 \dot{\gamma}^{0.42}$ corr = 0.989

SUSPENSION V (55%, pH = 10.4)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
	6	1.3, 1.2, 1.2	1.2 desv.=0.058	1.88	2.3
	12	0.73, 0.71, 0.70	0.71 desv.=0.015	3.77	2.7
2	30	0.033, 0.36, 0.35	0.35 desv.=0.015	9.42	3.3
	60	0.21, 0.22, 0.22	0.22 desv.=0.0058	18.9	4.2

Ecuación reológica: $\tau = 2.0 \dot{\gamma}^{0.25}$ corr = 0.999

SUSPENSION VI (55%, pH = 11.5)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
	6	0.15, 0.10, 0.15	0.13 desv. 0.029	1.88	0.24

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
2	12	0.14, 0.13, 0.15	0.14 desv.=0.01	3.77	0.53
	30	0.11, 0.090, 0.10	0.10 desv.=0.160	9.42	0.94
	60	0.073, 0.063, 0.068	0.068 desv.=0.0050	18.9	1.29

Ecuación reológica: $\tau = 0.18 \dot{\gamma}^{0.71}$ corr = 0.981

SUSPENSION VII (55%, pH = 12.4)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	6	5.6, 4.2, 5.4	5.1 desv.=0.76	1.88	9.6
	12	2.7, 2.2, 3.3	2.7 desv.=0.55	3.77	10.
	30	1.3, 1.2, 1.6	1.4 desv.=0.21	9.42	13.
	60	0.79, 0.80, 1.0	0.86 desv.=0.12	18.9	16.

Ecuación reológica: $\tau = 8.1 \dot{\gamma}^{0.24}$ corr = 0.961

SUSPENSION VIII (57%, pH = 1.7)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	6	11 (no considerado)			
	6	4.0, 2.0	3.0 desv.=1.0	1.88	5.6
	12	3.0, 3.0, 1.5	2.5 desv.=0.87	3.77	9.4
4	40	2.0, 2.0, 1.9	2.0 desv.=0.058	9.42	19.
	60	1.2, 1.2, 1.4	1.3 desv.=0.12	18.9	25.

Ecuación reológica: $\tau = 3.7 \dot{\gamma}^{0.68}$

corr = 0.994

SUSPENSION IX (57%, pH = 2.4)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	6	10., 6.1, 8.4	8.2 desv. = 2.0	1.88	15.
	12	7.7, 5.6, 8.4	7.2 desv.=1.5	3.77	27
4	30	1.3, 1.3, 1.4	1.3 desv.=0.058	9.42	12.
	60	1.2, 1.2, 090	1.1 desv.=0.17	18.9	21

SUSPENSION X (57%, pH = 4.7)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	6	11., 9.6, 8.2	9.6 desv.=1.4	1.88	18.
	12	9.2, 7.5, 6.0	7.6 desv.=1.6	3.77	29.
4	30	2.0, 1.9, 2.4	2.1 desv.=0.25	9.42	20.
	60	1.5, 1.4, 1.6	1.5 desv.=0.10	18.9	28.

SUSPENSION XI (57%, pH = 5.7)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	6	4.4, 7.2, 3.2	4.9 desv. 2.1	1.88	9.2
	23	4.8, 4.0, 4.5	4.4 desv.=0.40	3.77	17.
4	30	1.9, 1.1, 1.3	1.4 desv.=0.42	9.42	13.
	60	1.4, 0.85, 0.90	1.0 desv.=0.33	18.9	19.

SUSPENSION XII (57%, pH = 8.7)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
2	6	2.0, 1.7, 1.6	1.8 desv.=0.21	1.88	3.4
	12	1.0, 0.93, 0.91	0.95 desv.=0.047	3.77	3.6
	30	0.46, 0.43, 0.40	0.43 desv.=0.03	9.42	4.1
	60	0.28, 0.26, 0.25	0.26 desv.=0.015	18.9	4.9

Ecuación reológica: $\tau = 2.9 \dot{\gamma}^{0.17}$

corr = 0.978

SUSPENSION XIII (57%, pH = 9.4)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	6	9.0, 11., 9.4	9.8 desv.=1.1	1.88	18.
	12	4.7, 5.5, 4.7	5.0 desv.=0.46	3.77	19.
	30	2.0, 1.8, 1.9	1.9 desv.=0.10	9.42	18.
	60	1.1, 1.2, 1.0	1.1 desv.=0.10	18.0	21.

Ecuación reológica: $\tau = 18. \dot{\gamma}^{0.038}$

corr. 0.764

SUSPENSION XIV (57%, pH = 11.0)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
2	6	0.18, 0.15, 0.18	0.17 desv.=0.017	1.88	0.32
	12	0.18, 0.23, 0.24	0.22 desv.=0.032	3.77	0.83
	30	0.13, 0.14, 0.15	0.14 desv. 0.01	9.42	1.3
	60	0.088, 0.10, 0.11	0.099 desv.=0.011	18.9	1.9

Ecuación reológica: $\tau = 0.25 \dot{\gamma}^{0.73}$ corr. 0.970

SUSPENSION XV (57%, pH = 12.4)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
4	6	7.5, 8.0, 8.5	8.0 desv.=0.5	1.88	15.
	12	4.3, 6.5, 5.5	5.4 desv.=1.1	3.77	20.
	30	2.8, 3.7, 5.9	4.1 desv.=1.6	9.42	39.
	60	2.0, 2.6, 5.7	3.4 desv.=2.0	18.9	64.

Ecuación reológica: $\tau = 9.1 \dot{\gamma}^{0.68}$ corr = 0.995

SUSPENSION XVI (60%, pH = 1.7)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	6	15. (no considerado)			
	6	14. (no considerado)			
		4.0, 5.0	4.5	1.88	8.5
			desv.=0.5		
	12	33. (no considerado)			
		9.8 (no considerado)	3.7	3.77	14.
		5.3, 2.8, 2.8, 4.0	desv.=1.2		
4	30	3.9, 2.7, 2.5, 2.5	2.7	9.42	25.
		2.3, 2.1	desv.=0.64		
	60	1.9, 1.9, 1.7, 1.9, 1.7, 1.7	1.8	18.9	34.
		desv.=0.11			

Ecuación reológica: $\tau = 5.8 \dot{\gamma}^{0.62}$ corr. 0.995

SUSPENSION XVII (60%, pH = 5.1)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
3	6	12. (no considerada)			
	6	7.5, 6.5	7.0	1.88	13.
			desv.=0.5		
	12	3.3, 6.0, 5.5	4.9	3.77	18.
			desv.=1.4		
4	30	1.4, 1.5, 1.8	1.6	9.42	15.
			desv.=0.21		

60 1.3, 1.0, 0.95 1.1 18.9 21.
 desv.0.19

Ecuación reológica: $\zeta = 13. \dot{\gamma}^{(0.12)}$ corr = 0.667

SUSPENSION XVIII (60%, pH = 5.2)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	ζ (Pa)
3	6	16., 15., 12.	14. desv.=2.1	1.88	26.
	12	9.8, 5.3, 12	9.0 desv.=3.4	3.77	34.
4	30	4.4, 3.7, 5.6	4.6 desv.=0.96	9.42	43.
	60	2.2, 2.1, 2.0	2.1 desv.=0.10	18.9	40.

SUSPENSION XIX (60%, pH = 8.6)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	ζ (Pa)
3	6	6.8, 4.7, 5.0	5.5 desv.=1.1	1.88	10.
	12	3.2, 2.6, 2.6	2.8 desv.=0.35	3.77	11.
	30	1.4, 1.2, 1.1	1.2 desv.=0.16	9.42	11.
	60	0.85, 0.73, 0.68	0.75 desv.=0.087	18.9	14.

Ecuación reológica: $\tau = 9.2 \dot{\gamma}^{(0.11)}$ corr = 0.907

SUSPENSION XX (60%, pH = 9.1)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
	6	18., 22., 16	19. desv.=3.1	1.88	36.
	12	8.8, 11., 8.5	9.4 desv.=1.4	3.77	35.
4	30	4.6, 5.4, 5.0	5.0 desv.=0.40	9.42	47.
	60	3.1, 3.9, 3.4	3.5 desv.=0.40	18.9	66.

Ecuación reológica: $\tau = 28. \dot{\gamma}^{(0.27)}$ corr = 0.952

SUSPENSION XXI (60%, pH = 10.6)

Husillo	w(rpm)	viscosidades (Pa.s)	visc. media (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa)
	6	0.58, 0.55, 0.58	0.57 desv.=0.017	1.88	1.1
	12	0.51, 0.49, 0.53	0.51 desv.=0.020	3.77	1.9
2	30	0.28, 0.34, 0.36	0.33 desv.=0.042	9.42	3.1
	60	0.20, 0.21, 0.23	0.21 desv.=0.015	18.9	4.0

Ecuación reológica: $\tau = 0.83 \dot{\gamma}^{(0.57)}$ corr = 0.990

A partir de los datos (w, μ) , se puede obtener la curva reológica, para cada suspensión, usando las ecuaciones siguientes:

1.a Ecuación semiempírica (15 en 10).

$$\dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)} = (\pi/10) \times w \text{ (rpm)}$$

Es decir, si sustituimos w en revoluciones por minuto, obtenemos $\dot{\gamma}$ en segundos a la menos uno.

1.b Ley de Newton de la viscosidad

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

nota: la ecuación 1.a se aplica para el viscosímetro Brookfield LV, sin embargo, cuando se tiene un modelo RV es más adecuado utilizar otro procedimiento, (11).

Para facilitar el análisis de los datos, se usa el modelo de la ley de la potencia: $\tau = K|\dot{\gamma}|^n$, donde τ es el esfuerzo de corte (o densidad de flujo de cantidad de movimiento en la dirección radial), K y n son los parámetros reológicos de la

ley de la potencia y $\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación.

La ley de la potencia se puede escribir de la siguiente forma:

$$\ln \tau = \ln K + n \ln \dot{\gamma}$$

de la ecuación anterior se observa que si se grafica $\ln \tau$ contra $\ln \dot{\gamma}$, se obtiene una recta. Lo anterior ocurrirá sólo si el material se comporta de acuerdo a la ley de la potencia.

A los datos $(\ln \dot{\gamma}, \ln \tau)$ se les ajustó una recta por medio del método de mínimos cuadrados -- obteniendo $\ln K$ (ordenada al origen) y n (pendiente), así como el factor de correlación correspondiente (corr.).

Nota: este procedimiento, así como el trazo, se realizó sólo con algunos conjuntos de datos, ya que hubo suspensiones en las que, por su naturaleza reológica, fue necesario utilizar 2 husillos en una misma determinación, obteniendo datos irregulares.

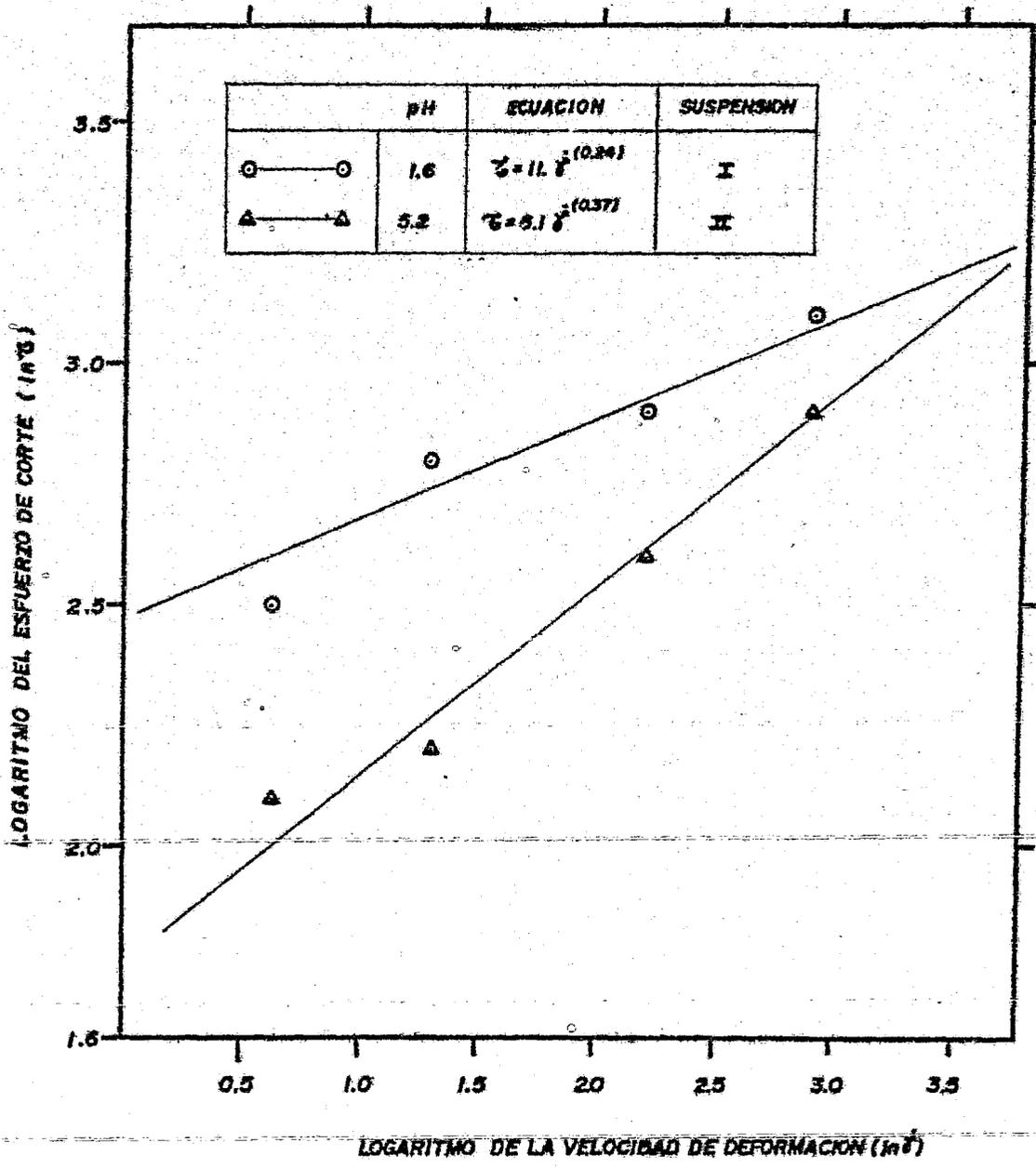


FIG. 21 EFECTO DEL pH SOBRE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DE SUSPENSIONES CON 55% DE SOLIDOS

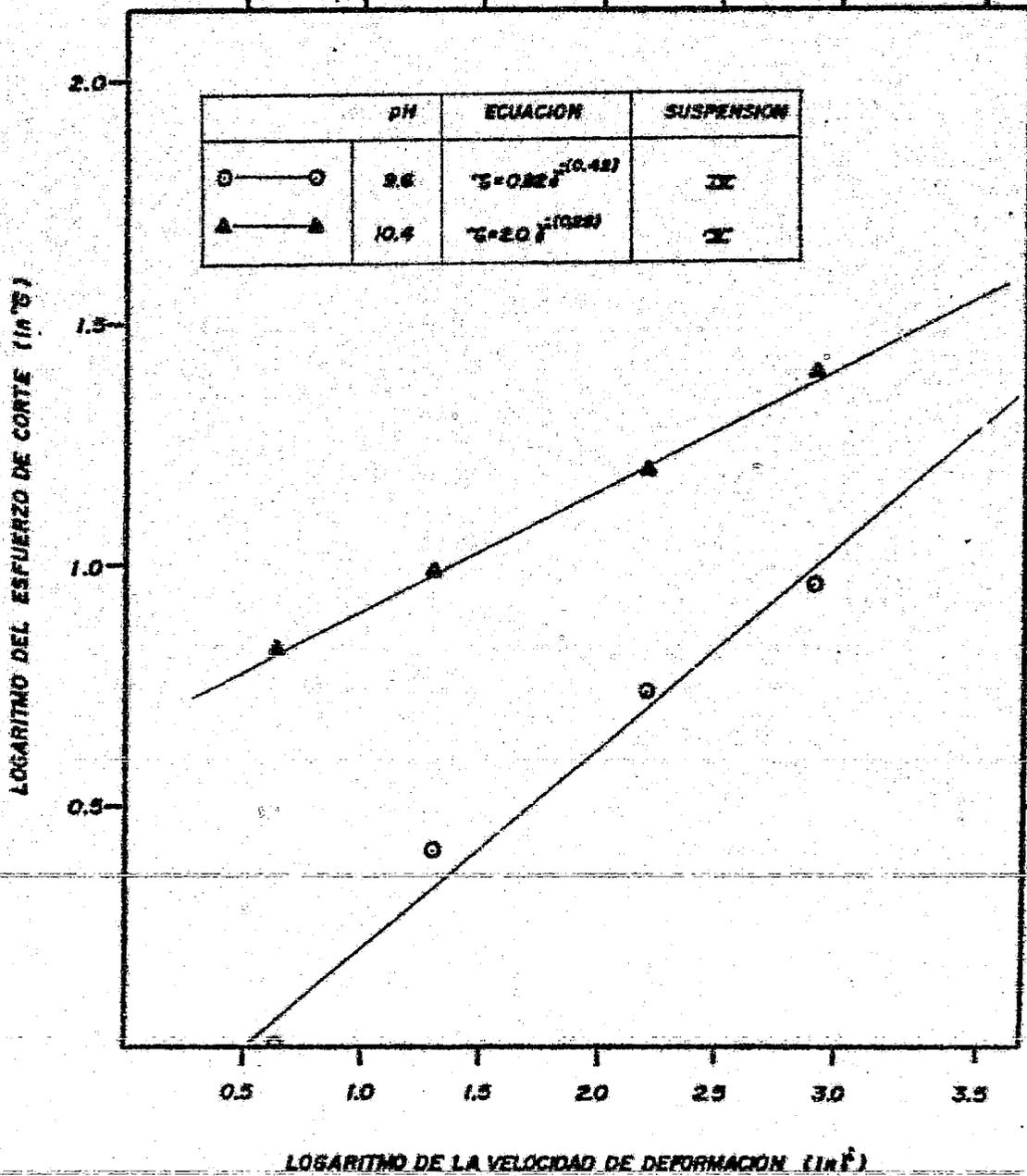


FIG. 22 EFECTO DE pH SOBRE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DE SUSPENSIONES CON 55% DE SOLIDOS

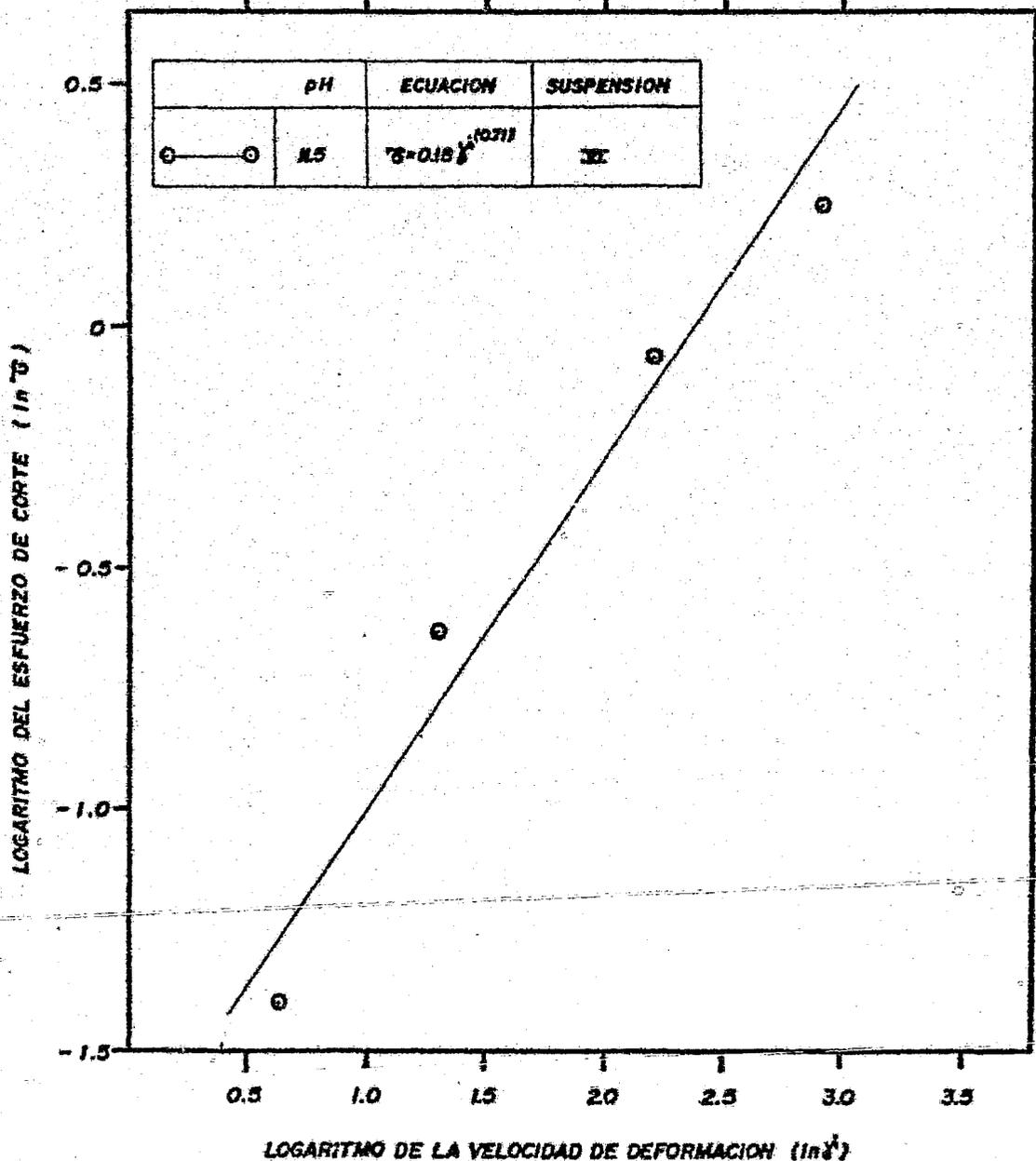


FIG. 23 CURVA REOLOGICA PARA UNA SUSPENSION CON 55% DE SOLIDOS

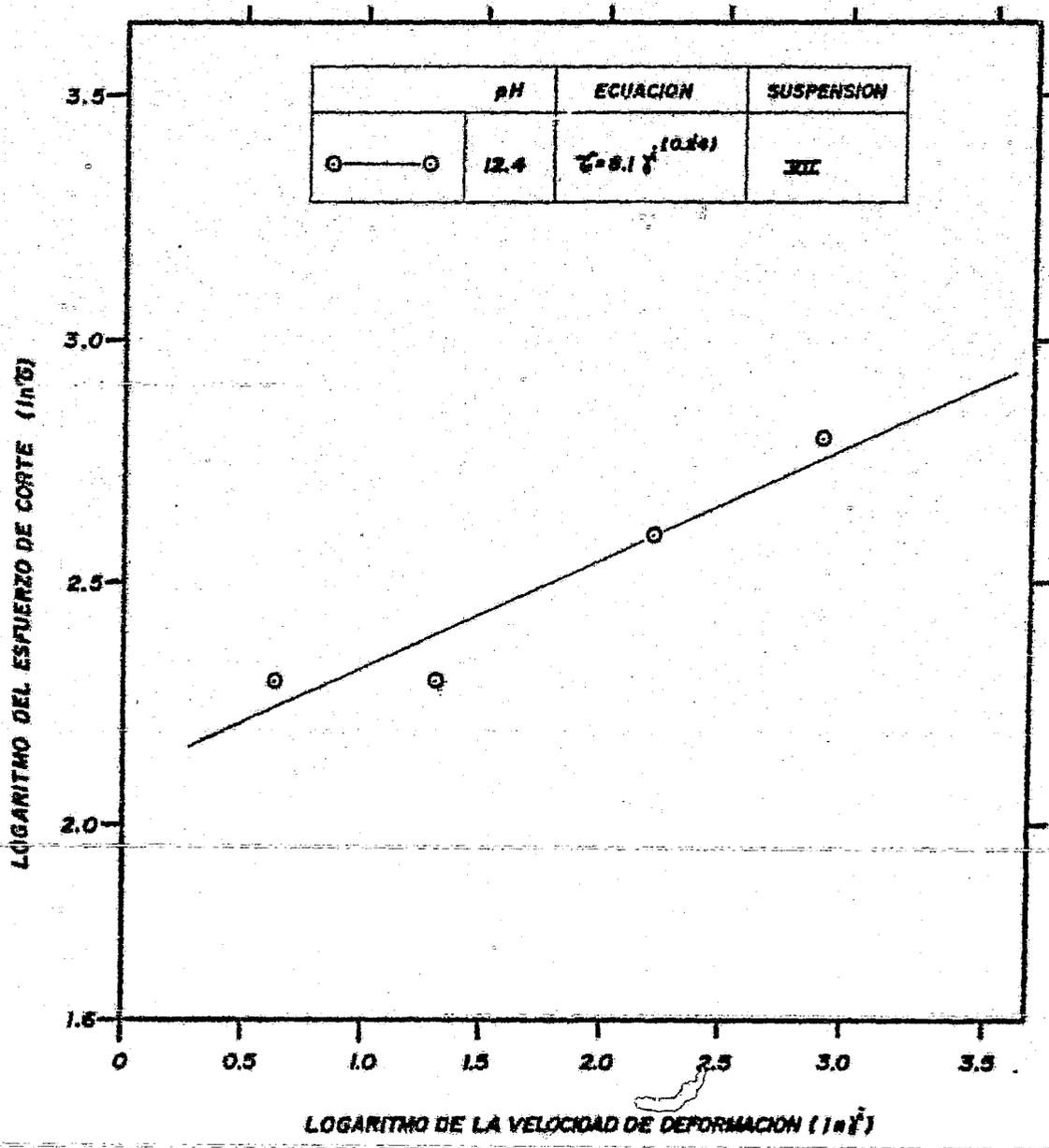


FIG. 24 CURVA REOLOGICA PARA UNA SUSPENSION CON 55% DE SOLIDOS

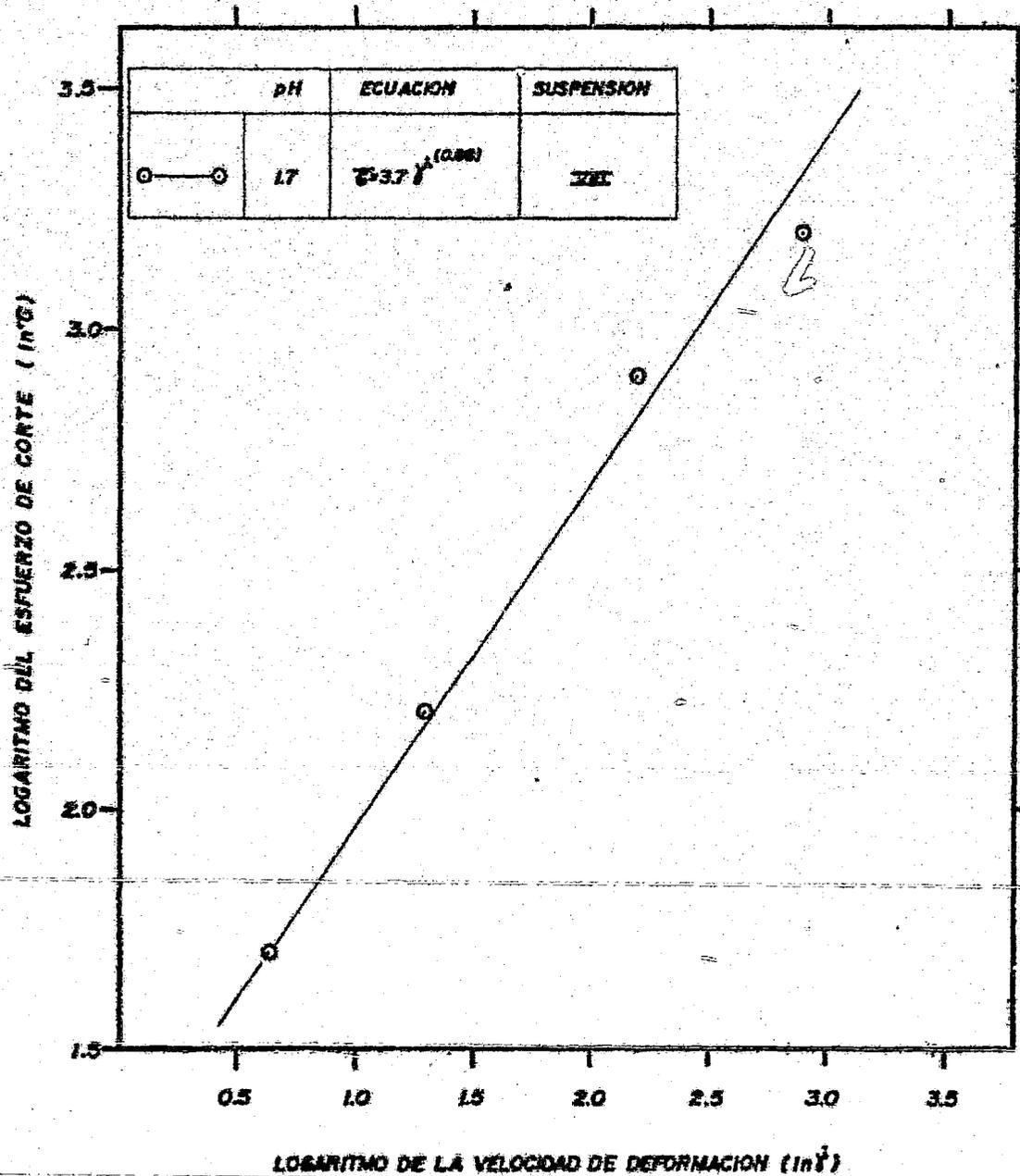


FIG. 25 CURVA REOLOGICA PARA UNA SUSPENSION CON 57% DE SOLIDOS

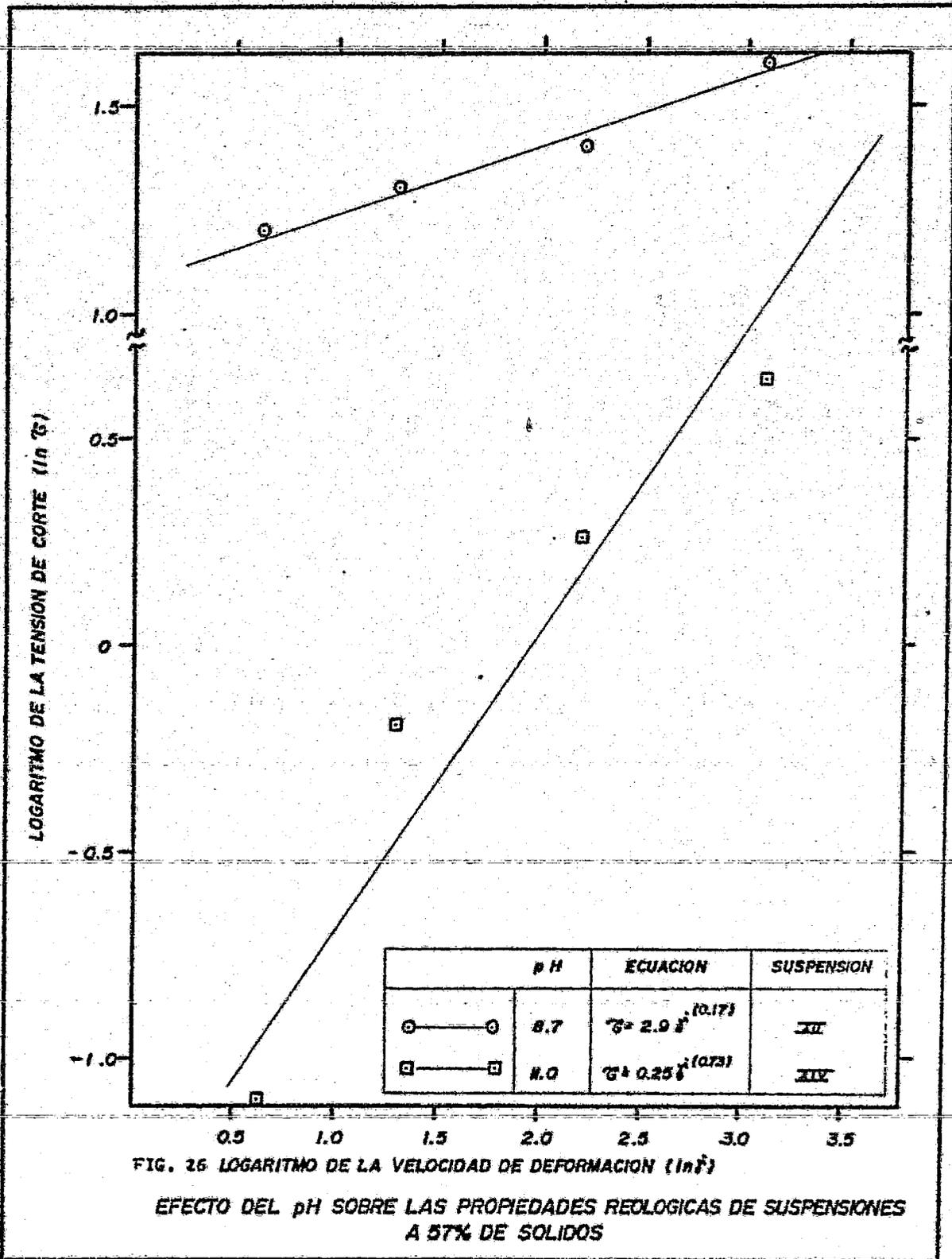


FIG. 26 LOGARITMO DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACION ($\ln \dot{\gamma}$)

EFFECTO DEL pH SOBRE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DE SUSPENSIONES A 57% DE SOLIDOS

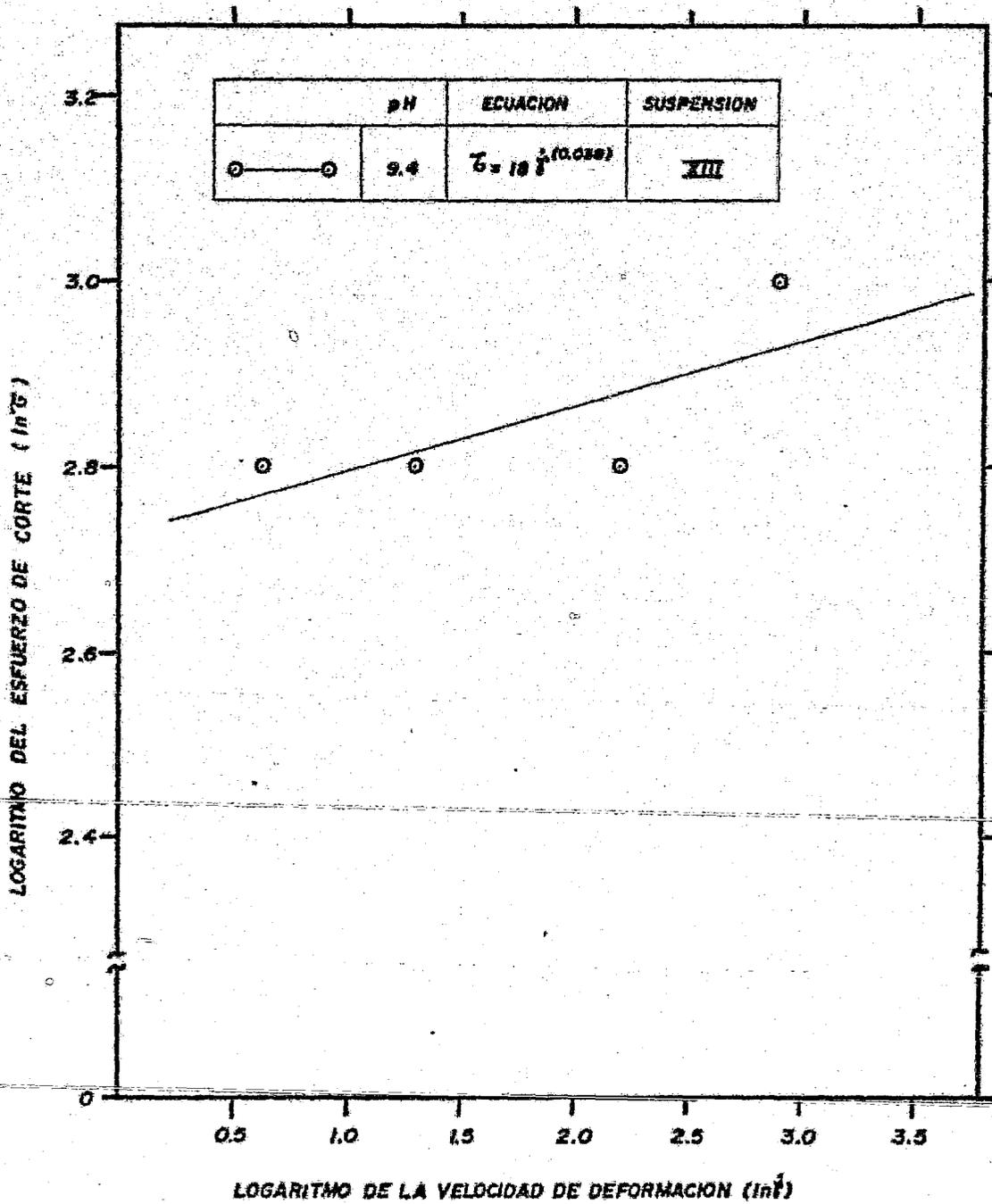


FIG. 27 | CURVA REOLOGICA PARA UNA SUSPENSION CON 57% DE SOLIDOS

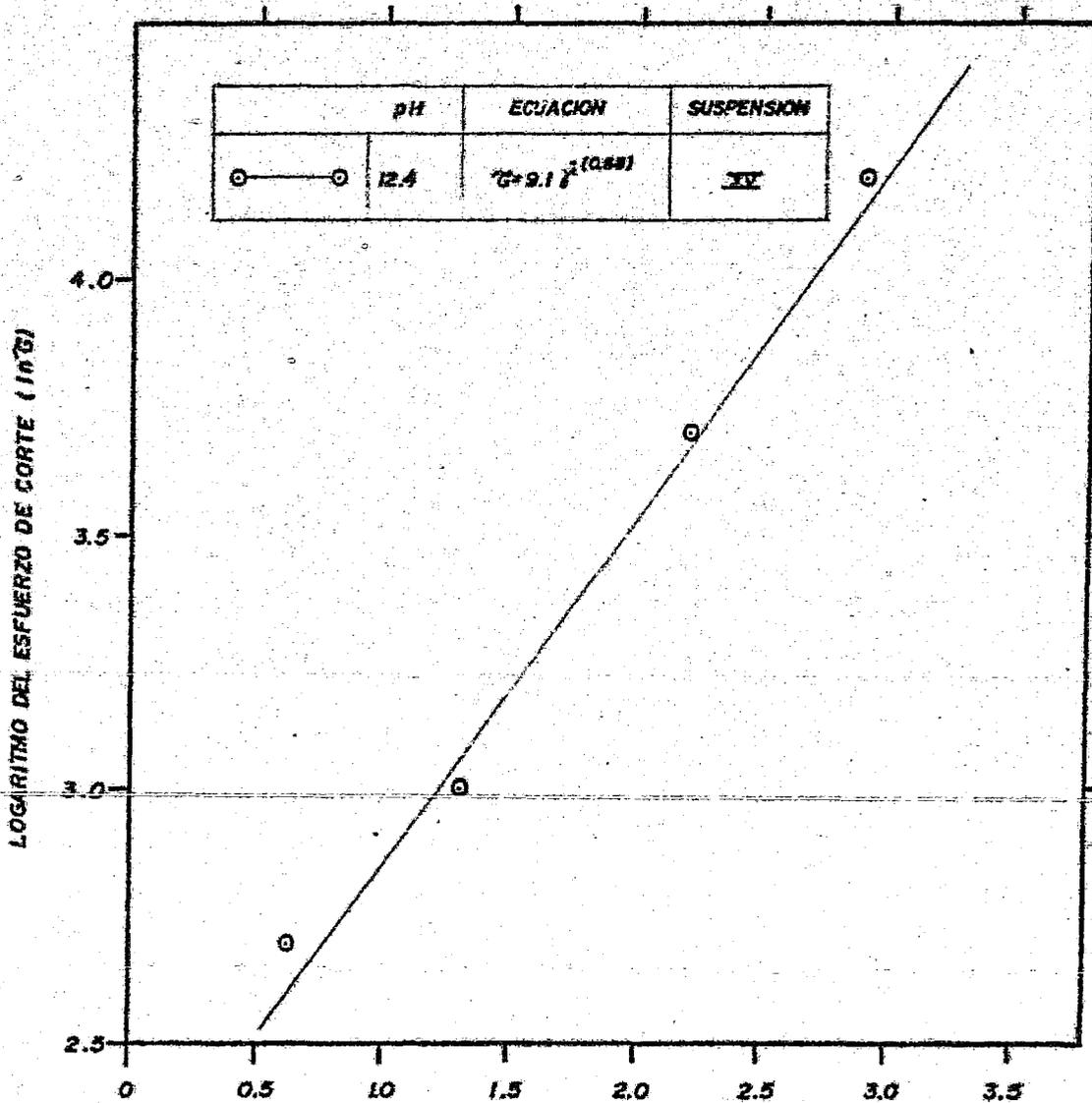


FIG. 28 LOGARITMO DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACION (1/s)

CURVA REOLÓGICA PARA UNA SUSPENSION CON 57% DE SOLIDOS

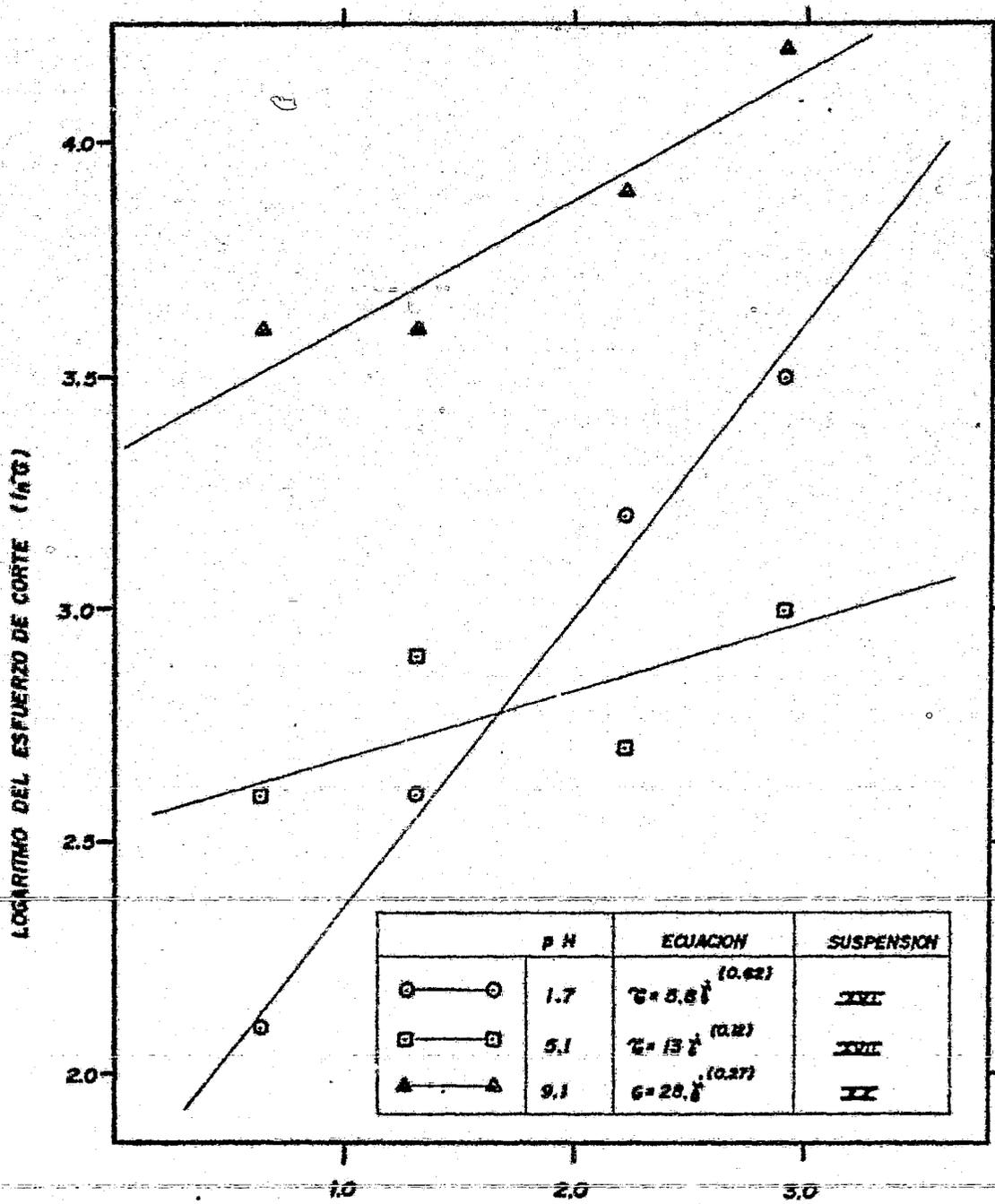


FIG. 29 LOGARITMO DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACION (ln s⁻¹)

EFFECTO DEL pH SOBRE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DE SUSPENSIONES
CON 60% SOLIDOS

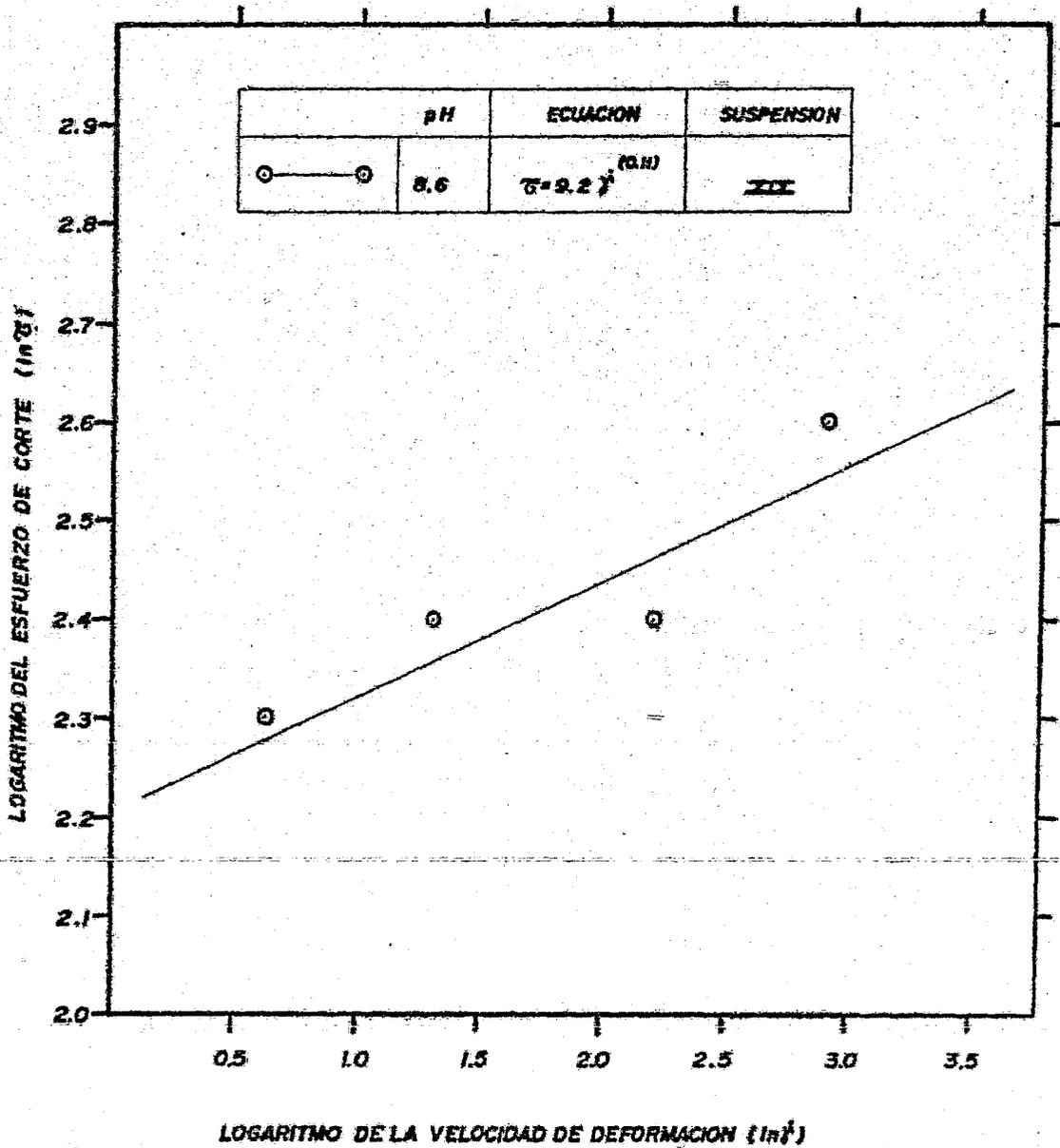


FIG. 30 CURVA REOLOGICA DE UNA SUSPENSION CON 60% DE SOLIDOS

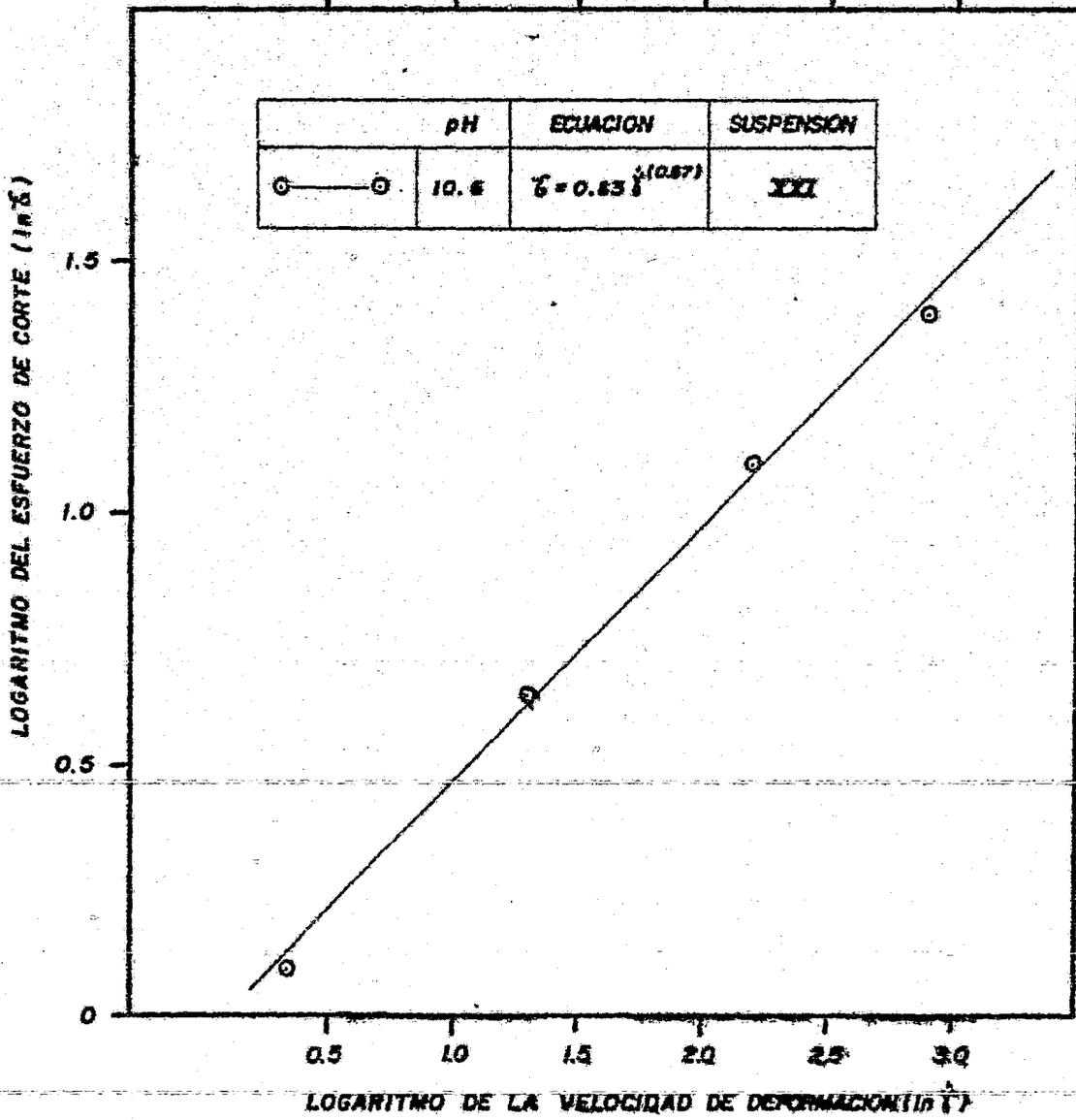


FIG. 31 CURVA REOLOGICA DE UNA SUSPENSION CON 60 % DE SOLIDOS

DISCUSION . DE RESULTADOS

Se presenta la variación de $\ln \tau$ en función de $\ln \dot{\gamma}$.

Las figuras 21 a 24 se refieren a suspensiones con 55% de sólidos.

En la figura 21, se observa que en el intervalo de 0,6 a 3,0 de $\ln \dot{\gamma}$, el valor correspondiente de $\ln \tau$ es mayor para pH bajos que para pH altos. A mayores valores de pH, el comportamiento de la suspensión se aproxima más al de un fluido newtoniano (n tiende a 1).

En la figura 22, con condiciones de pH de 9.6 y 10.4, se observa un comportamiento exactamente opuesto al anterior.

En la figura 23, se observa que bajo condiciones alcalinas, la viscosidad (valor de K) es muy pequeña y que el comportamiento newtoniano de

la suspensión aumenta ($n = 0.71$).

En la figura 24, la viscosidad es mayor con respecto al caso anterior, asimismo, hay un alejamiento con respecto al comportamiento newtoniano (n ha disminuído).

Las figuras 25 a 28 se refieren a suspensiones con 57% sólidos.

En la figura 25 se observa la variación de $\ln \zeta$ con respecto a $\ln \dot{\gamma}$ en una suspensión con 57% de sólidos y un pH de 1.7.

En la figura 26, se observa que al aumentar el pH, disminuye la viscosidad, y el comportamiento del fluído se aproxima más al newtoniano ($n = 0.73$). Análogamente con respecto a la figura 21, a pesar de tener diferentes porcentajes de sólidos y pH.

En la figura 27, se observa una curva con un

coeficiente de correlación de 0.764, un valor de K de 18, y un valor de n de 0.038, es decir, se trata de un material con una viscosidad alta y muy alejado del comportamiento de fluido newtoniano.

En la figura 28, se tiene un pH más alcalino con respecto al caso anterior, y su viscosidad es menor. Su comportamiento es más próximo al de un fluido newtoniano que el caso anterior.

Las figuras 29 a 31 se refieren a suspensiones con 60% de sólidos.

En la figura 29, se observa que al aumentar el pH, desde 1.7 hasta 9.1, aumenta la viscosidad y disminuye el comportamiento newtoniano.

En las figuras 30 y 31 se observa que al aumentar el pH, desde 8.6 hasta 10.6 respectivamente, la viscosidad disminuye, y aumenta el comportamiento newtoniano.

Los resultados que muestran una variación inversa de la viscosidad con el pH (figuras 21, 26, 28, 30 y 31), están en pleno acuerdo con las teorías actuales sobre la variación de la viscosidad con el pH (floculación), (pág. 47), sin embargo, en algunos casos la viscosidad no sigue el comportamiento mencionado (figuras 22, 24, 27, 29).

El efecto del porcentaje de sólidos fue irregular. En un caso, al aumentar el porcentaje de sólidos disminuyó la viscosidad (suspensiones III y XI), lo cual contradice lo establecido (capítulo III), pero en otro caso la variación es directa (suspensiones VIII y XVI).

SUSPENSION III (55%, pH = 5.7)

SUSPENSION XI (57%, pH = 5.7)

SUSPENSION XVI (60%, pH = 1.7)

SUSPENSION VIII (57%, pH = 1.7)

Las suspensiones XIII y XVII presentaron ---

un coeficiente de correlación muy bajo (0.764 y --
0.667) por lo que no se les aplica el modelo de la
ley de la potencia.

SUSPENSION XVII (60%, pH = 5.1)

SUSPENSION XIII (57%, pH = 9.4)

En general, se pueden atribuir las desviaciones que algunos resultados presentan, con respecto a lo esperado, al comportamiento no-newtoniano de las suspensiones. Como se mencionó en el capítulo IV (pág. 56), un viscosímetro es útil sólo si se desea caracterizar reológicamente a un fluido puro - (capítulo II, pág. 20). En estos casos, se trata de un material que, por lo visto, está alejado de dicho comportamiento.

CONCLUSIONES

1. Se encontró que el comportamiento reológico de suspensiones de arcilla, con contenidos de sólidos entre 55 y 60%, valores de pH desde 1 hasta 13 y velocidades de deformación entre 1 y 20 s^{-1} es:

-Pseudoplástico: todos los valores de n , del modelo de la ley de la potencia, resultaron menores que 1.

Tixotrópico: la viscosidad disminuye al pasar el tiempo (figura 20).

2. Bajo las condiciones experimentales con las que se trabajó, se observa, en general, una variación inversa de la viscosidad con el pH, asimismo se observaron algunas excepciones de tal comportamiento (figuras 22, 24, 27, 29).

3. El porcentaje de sólidos actuó en forma irregular, por lo que, al menos en las condiciones experimentales de este trabajo, no se puede concluir algo al respecto.

4. Esencialmente todas las suspensiones presentaron un acercamiento al comportamiento newtoniano cuando disminuía la viscosidad, excepto el caso de las suspensiones XVII y XX, en donde se observa el efecto opuesto (figura 29). Suspensión XVII (60%, pH=5.1), -- Suspensión XX (60%, pH=9.1).

5. Este método de obtención de viscosidades, -- aplica para flujo laminar y bajas velocidades de deformación, por lo que los datos -- obtenidos en este trabajo, deben usarse sólo para tener idea del orden de magnitud de la viscosidad.

FUENTES DE ERROR

1. No se determinó la distribución de tamaño de partícula en la suspensión, debido a los problemas inherentes a la naturaleza del mismo.
2. La temperatura no fue controlada, en el rango de 19 a 22°C, considerándose constante en todos los experimentos.
3. Efecto de los iones Cl^- y Na^+ en la floculación de la suspensión.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

1. Para superar la limitación de flujo laminar, se puede utilizar un viscosímetro de flujo telescópico (capítulo IV), aunque en este caso, el control de la velocidad de deformación no es tan bueno como el viscosímetro Brookfield. El tubo capilar puede superar los problemas de sedimentación.

2. Aunque no se mencionó, el material presenta comportamiento de plástico de Bingham. La determinación del esfuerzo crítico τ_c , se puede intentar realizar con un viscosímetro de Couette en ausencia de equipos más sofisticados.

2. Si se desea conocer el comportamiento tixotrópico, se pueden obtener curvas de viscosidad contra tiempo (figura 20).

El viscosímetro Brookfield es el más adecuado para tal labor.

4. Si se desea probar la hipótesis de que las desviaciones de los resultados, con respecto a lo esperado, se deben a que el comportamiento de las suspensiones se alejan demasiado del de un fluido puro (Capítulo III), es necesario repetir las pruebas no con un viscosímetro, sino con un reogonómetro (capítulo IV, pág. 71)

APENDICE 1. PRACTICA PROPUESTA PARA EL CURSO-
DE FENOMENOS DE TRANSPORTE

1) OBJETIVOS:

1.a Que el alumno pueda distinguir, la naturaleza reológica de un fluido, con la ayuda del viscosímetro Brookfield.

1.b Que el alumno obtenga una curva de flujo.

Como objetivo optativo se propone:

1.c Que el alumno detecte la influencia (semi--cuantitativamente) de algunas variables; tales como pH, porcentaje de sólidos, en las propiedades reológicas de suspensiones arcillosas, o no arcillosas o de soluciones.

2) CUESTIONARIO

Para que el alumno pueda lograr un máximo aprove--

chamiento, se recomienda la resolución del cuestio
nario siguiente:

2.1 ¿Qué es un fluído?

2.2 ¿Cómo se clasifican los fluídos de acuerdo a su comportamiento reológico?

2.3 ¿Qué es un fluído no-newtoniano?

2.4 ¿Cuál es el modelo matemático de la ley de la potencia, y que significan cada uno de los términos en la ecuación?

2.5 ~~Escriba, brevemente, el principio de un viscosímetro Couette.~~

2.6 ~~Escriba, brevemente, el principio de un viscosímetro Brookfield.~~

2.7 ¿Cómo se puede obtener la curva reológica -- (τ vs $\dot{\gamma}$) para un fluído, a partir de los --

datos de un viscosímetro de Couette (ecuaciones)?

2.8 La misma pregunta, pero para un viscosímetro Brookfield.

Para responder a las preguntas 1 a 7, el alumno deberá consultar la literatura. La pregunta 2.8 por su complejidad, deberá ser discutida por el profesor y los alumnos, utilizando las referencias (11, 10) cuyo resumen se incluye a continuación.

2a. Obtención de la curva reológica, a partir de datos de un viscosímetro Brookfield LV (10).

Se utilizan las ecuaciones siguientes:

2a.1 Ecuación semiempírica $\dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)} = (\pi/10) \times \omega \text{ (rpm)}$

2a.2 Ley de Newton de la viscosidad $\tau = \mu \dot{\gamma}$

El viscosímetro proporciona la viscosidad μ , y la velocidad angular, w , de ahí se obtiene $\dot{\gamma}$ y después τ .

2b. Obtención de la curva reológica, a partir de datos de un viscosímetro Brookfield RV (1).

Estos aparatos también proporcionan valores de viscosidad y velocidad angular, sin embargo la información requerida en este caso, es la lectura del viscosímetro en la escala 0-100 (α_i) y la velocidad angular, w_i (rpm).

El procedimiento, según Mitschka (11), para obtener la curva reológica, es el siguiente:

2b.1 Se toman valores de lectura (α_i) en función de la velocidad angular, w_i (rpm), para los diferentes husillos.

2b.2 Las lecturas del viscosímetro (α_i) se transforman a esfuerzos de corte promedio, usando la

ecuación:

$$\tau_i = k_{\alpha\zeta} \alpha_i$$

donde $k_{\alpha\zeta}$ es un coeficiente que depende de la forma y tamaño del husillo, y se lee en la tabla 3.

TABLA 3. Factores de conversión para los husillos de un viscosímetro - Brookfield RVT. (bajo condiciones estándar de medición).

husillo número	1	2	3	4	5	6	7	
$k_{N\tau}$	0.035	0.119	0.279	0.539	1.05	2.35	8.4	
$n = 0.1$	1.728	1.431	1.457	1.492	1.544	1.366	1.936	
0.2	0.967	0.875	0.882	0.892	0.907	0.851	1.007	
0.3	0.705	0.656	0.656	0.658	0.663	0.629	0.681	
0.4	0.576	0.535	0.530	0.529	0.528	0.503	0.515	
0.5	0.499	0.458	0.449	0.445	0.442	0.421	0.413	
$k_{N\gamma}$	0.6	0.449	0.404	0.392	0.387	0.382	0.363	0.346
0.7	0.414	0.365	0.350	0.343	0.338	0.320	0.297	
0.8	0.387	0.334	0.317	0.310	0.304	0.286	0.261	
0.9	0.367	0.310	0.291	0.283	0.276	0.260	0.232	
1.0	0.351	0.291	0.270	0.262	0.254	0.238	0.209	

2b.3 Las parejas de datos (w_i, τ_i) , obtenidas para cada husillo, se grafican en papel log-log.

2b.4 Si la gráfica obtenida se aproxima a una recta, entonces el fluido bajo prueba obedece la ley de la potencia. La pendiente de la curva $\log \tau_i$ contra $\log w_i$ es igual al índice de flujo n , del fluido.

La velocidad de deformación, $\dot{\gamma}_i$, se calcula con la ecuación siguiente:

$$\dot{\gamma}_i = k_{N\dot{\gamma}}(n) w_i$$

donde $k_{N\dot{\gamma}}(n)$ es un coeficiente que depende del fluido y del husillo del viscosímetro; su valor está dado en la tabla 3.

Cuando no es posible aproximar la gráfica $\log \tau_i$ vs. $\log w_i$, con suficiente exactitud, a una línea-

recta; se traza una curva que se ajuste a los -- puntos. A partir de esta curva se evalúa la pendiente en cada punto (tomando intervalos pequeños) obteniendo $\dot{\bar{n}}_i^* \cdot (w_i)$, es decir, valores del índice de flujo del fluido para cada velocidad angular. La ecuación es:

$$\dot{\bar{n}}_i^* = \frac{\log \tau_{i+1} - \log \tau_{i-1}}{\log w_{i+1} - \log w_{i-1}}$$

donde w_{i+1} y w_{i-1} son velocidades angulares, un -- intervalo arbitrariamente pequeño adelante y --- atrás de w_i , respectivamente; y τ_{i+1} , τ_{i-1} , son los respectivos esfuerzos de corte, leídos a partir de la curva trazada.

La rapidez de deformación es: $\dot{\gamma}_i = K_N \gamma (\dot{\bar{n}}_i^*) w_i$

2b.5 Las parejas de datos $(\dot{\gamma}_i, \tau_i)$ constituyen una curva reológica.

Nota: debe recordarse que los resultados obtenidos son válidos sólo para un régimen laminar en -- estado estable.

3) PROCEDIMIENTO

3.1 Se preparan 2 suspensiones o soluciones, para determinar sus curvas reológicas, que difieran en una variable, por ejemplo pH o porcentaje de sólidos.

El viscosímetro Brookfield mide viscosidades no muy bajas (mayores que 1 poise), por lo que se debe tener cuidado al escoger la suspensión o solución con una viscosidad mayor que aquél valor.

3.2 Utilizando cualquier modelo de viscosímetro Brookfield y el correspondiente método de procesamiento de datos, se obtiene la curva reológica para cada muestra.

4) CUESTIONARIO

4.1 ¿Qué tipo de fluido se encontró: newtoniano o no-newtoniano?

4.2 Si su respuesta es no newtoniano, ¿cuáles son los parámetros de la ley de la potencia, en caso de que siga dicho comportamiento?

4.3 ¿Qué diferencia existe entre las curvas de flujo obtenidas?

5) CONCLUSIONES

La bibliografía para la resolución del cuestionario es: (1, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 17).

1. El primer paso, es seleccionar el husillo -- adecuado. Los distintos husillos permiten - la determinación de viscosidades en un am - plio rango; entre mayor sea el husillo, ma- yor será la sensibilidad del aparato, por lo que se podrán medir viscosidades bajas. Si utilizamos un husillo pequeño, la sensibili- dad disminuye, por lo que será posible medir sólo viscosidades altas.

2. Seleccionar una velocidad angular.

La velocidad angular, controlada mediante -- un tornillo (figura 13), tiene como propósi- to el poder regular el intervalo de medición de la viscosidad; es similar al propósito - del husillo. A mayor velocidad angular del husillo, menores serán las viscosidades que se puedan medir y viceversa.

3. Atornillar, ~~manualmente, un husillo a la~~ flecha del viscosímetro. Es mejor levantar la flecha mientras se atornilla el husillo.

4. Meter el husillo en el material de prueba, evitando las burbujas. Si no se usaran las guardas de metal (figura 13), se deberá evitar que los husillos rocen contra las paredes del recipiente.

Nota: Es mejor usar las guardas, porque el viscosímetro está calibrado, desde su fabricación, tomando en cuenta dicha guarda.

5. Nivele el viscosímetro, haciendo uso del nivel de burbuja, para que el husillo quede vertical.

6. Oprima el embrague y encienda el motor. Suelte el embrague y permita que la escala 0-100, gire junto con el indicador, hasta que éste se estabilice en un punto dado.

El tiempo requerido para la estabilización dependerá de la velocidad angular del husillo y del material bajo prueba. Considérese, en las primeras pruebas, que sea de 30 segundos aproximadamente. A bajas velocidades es posible observar la posición del indicador, pero a mayores velocidades será necesario bajar el embrague y parar el motor.

7. Si se requiere verificar las lecturas, encienda el motor con el embrague puesto, manteniendo la lectura anterior, y luego suba el embrague, así se acortará el tiempo de lectura al reducirse las oscilaciones del indicador. Si el indicador no se estabiliza, el material puede ser tixotrópico o la temperatura no es constante.

8. La viscosidad se obtiene con la reglilla de conversión (pág. 66). Para convertir las lecturas a centipoise, ajuste la reglilla al modelo de viscosímetro (LV, RV) y al nú-

mero del husillo usado; multiplique la lectura del viscosímetro por el factor dado al lado de rpm., y se obtendrá la viscosidad en centipoise.

BIBLIOGRAFIA

1. R.B. Bird, Steward, Lightfoot. Trad. Dr. Fidel Mato V. Fenómenos de transporte. Reverte. España (1980), Cap. 1.
2. K.E. Spells. Trans. Inst. Chem. Eng. (London), 33, no. 2, (1955), pp 79-82.
3. Zdenek K. Jelinek. Particle Size Analysis. - Ellis Horwood LTD. Checoslovaquia (1970), -- Caps. 1 y 9.
4. D. Carroll. Clay minerals: A guide to their X-ray identification. The Geological Society of America (Special paper 126). Cap. 1.
5. Juárez, I.J., Méndez N.M., Trápaga M.G., Te
sis: Caracterización de 6 caolines mexica
nos y evaluación de su potencialidad como ma
teria prima para la obtención de alúmina de
grado metalúrgico. México (1980).
6. Perry and Chilton. Chemical Engineer's Hand-
book. McGraw-Hill. Fifth edition (1973). --
pags. 3-210 a 3-213 y 3-246.
7. A.G. Fredrickson. Principles and applica
tions of Rheology. Prentice-Hall, (1964). -
Cap. 1.
8. W.L. Wilkinson. Non-newtonian fluids. Per-
gamon Press, (1960). Caps. 1, 2, 6.

9. A.B. Metzner. Non-newtonian technology: -
Fluid mechanics, mixing, and heat transfer; -
Advances in Chemical Engineering, (1956).

10. Walters K. (ed.). Rheometry: Industrial ap-
plications. Research Studies press, (1980)
Cap. 7.
11. P. Mitchska. Simple conversion of Brook -
field R.V.T. readings into viscosity func -
tions. Rheol. Acta, vol. 21, no. 2, pp. 207
-209 (1982).
12. López L. Tesis: Diseño de tuberías para -
fluídos no-newtonianos. México, (1975).
13. Manero B.D. Tesis: Determinación de pro -
piedades de líquidos mediante un viscosíme -
tro de esfera rotatoria. México, (1976).
14. Klockmann F. Trad. F. Pardillo. Tratado de
mineralogía. Editorial Gustavo Gili, Barce -
lona (1960), pág. 624.

15. Dana E.S., Ford W.E. Trad. Alberto Berumen.
Tratado de mineralogía. Compañía editorial -
continental. México, (1979).

16. Roberts, Rapp, Weber. Encyclopedia of Mine -
rals. Van Nostrand Reinhold, (1974), pp. 318,
256, 362, 28, 58, 263, 540, 460, 382, 138, -
470, 520.

17. M. Reiner. Deformation, Strain, and Flow. In
terscience. New York, (1960).