

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Determinación en laboratorio de los parámetros reológicos de mezclas agua-sedimentos para el cálculo de flujos de lodos y debris.
<i>Autor / Adscripción</i>	Ignacio A. Caldiño Villagómez Isaac Bonola Alonso Gilberto Salgado Maldonado Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 17(3): 27-35
<i>Fecha de publicación</i>	2002
<i>Resumen</i>	Los flujos de lodos y debris causan múltiples pérdidas económicas y de vidas humanas en diversos lugares del mundo, entre los que se incluye México, ya que algunos estados como Guerrero, Puebla, Chiapas y el Estado de México han sufrido severamente las consecuencias de este fenómeno. Con fines de predicción y consiguientes medidas de prevención, se han desarrollado modelos numéricos que requieren conocer parámetros reológicos de las mezclas agua-sedimentos. Para entender mejor la influencia de estos últimos, es necesaria su observación y análisis con base en pruebas experimentales y, de ser posible, en campo en condiciones reales, lo cual implica dificultades y riesgos por la propia naturaleza del fenómeno.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/721

Determinación en laboratorio de los parámetros reológicos de mezclas agua-sedimentos para el cálculo de flujos de lodos y *debris*

Ignacio A. Caldiño Villagómez
Isaac Bonola Alonso
Gilberto Salgado Maldonado

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Los flujos de lodos y debris causan múltiples pérdidas económicas y de vidas humanas en diversos lugares del mundo, entre los que se incluye México, ya que algunos estados como Guerrero, Puebla, Chiapas y el Estado de México han sufrido severamente las consecuencias de este fenómeno.

Con fines de predicción y consiguientes medidas de prevención, se han desarrollado modelos numéricos que requieren conocer parámetros reológicos de las mezclas agua-sedimentos. Para entender mejor la influencia de estos últimos, es necesaria su observación y análisis con base en pruebas experimentales y, de ser posible, en campo en condiciones reales, lo cual implica dificultades y riesgos por la propia naturaleza del fenómeno. A partir de estas herramientas se tienen avances en el conocimiento del comportamiento de estos flujos, del tipo no newtoniano, y su tratamiento generalizado considera en su cálculo funciones de la viscosidad y del esfuerzo de cedencia.

En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) se efectuaron mediciones de la viscosidad utilizando dos viscosímetros capilares comerciales, limitados por sus características físicas a mezclas agua-arcilla con concentraciones menores del 11% en volumen (25% en peso), cuyos efectos se han reportado con anterioridad. En este artículo se presentan los resultados de las pruebas hechas en un viscosímetro Brookfield a muestras agua-arcilla y agua arcilla-arena-fina, con concentraciones mayores a las señaladas.

La arcilla utilizada en las pruebas corresponde a suelos que se localizan en gran parte del estado de Morelos (grupo Chichinautzin), de consistencia blanda a firme, de alta plasticidad con características expansivas, de color gris oscuro, con una densidad específica de 2.55. El material granular usado es una arena fina uniforme (pasa la malla núm. 100), de origen volcánico, recolectada de la región del Ajusco, de color negro y con una densidad específica de 2.58.

Para obtener las funciones reológicas de rapidez de deformación-viscosidad y rapidez de deformación-esfuerzo cortante, se utilizó el procedimiento de Mitchka, ya que no es posible obtenerlas en forma directa debido a las limitaciones del viscosímetro Brookfield.

Con dicho procedimiento se obtuvieron las relaciones señaladas de las mezclas con distintas concentraciones. Tales relaciones pueden utilizarse en los modelos de simulación numérica para calcular el comportamiento de estos flujos en zonas de México con sedimentos de características similares.

Palabras clave: flujos de lodos, parámetros reológicos de mezclas agua-sedimentos.

Introducción

Los flujos de lodos y *debris* causan cuantiosos daños humanos y materiales en diferentes partes del planeta y

en los últimos años su ocurrencia se ha acentuado en México.

Los modelos numéricos que describen estos flujos son una herramienta útil para predecir, de manera aproxima-

da, su comportamiento hidráulico durante su transporte y la configuración de la zona de depósito.

La viscosidad y el esfuerzo de cedencia de mezclas agua-sedimentos son parámetros reológicos necesarios para la aplicación de los modelos de cálculo de los flujos con altas concentraciones de sedimentos. A la fecha, no se tiene conocimiento sobre mediciones en México de estos parámetros para los flujos de lodos y *debris* naturales. Una opción que se ha seguido para realizar los análisis numéricos en México consiste en tomar valores reportados de sitios en otros países, como Estados Unidos de América o China, en donde se dispone de mayor cantidad de reportes. El resto de la información que requieren estos modelos consiste principalmente de la topografía, hidrología y condiciones del suelo, cuya obtención y manejo es más común en estudios y proyectos de ingeniería hidrológica e hidráulica en México.

Debido a la necesidad de simular estos fenómenos para contar con bases al momento de tomar acciones adecuadas de prevención, planeación, mitigación y control, se efectuaron mediciones experimentales de la viscosidad con un viscosímetro Brookfield a mezclas agua-arcilla con concentraciones volumétricas de aproximadamente 14 a 28% (30 a 50% en peso) y para mezclas agua-arcilla-arena fina con concentraciones volumétricas de aproximadamente 24 a 56% (30 a 71% en peso). A partir de estas mediciones, aplicando el procedimiento de Mitchka (1982) se obtuvieron las funciones para determinar la viscosidad y la relación esfuerzo cortante-rapidez de deformación, definiéndose con todo ello una metodología para preparar las muestras y efectuar las mediciones.

Conceptos básicos

Las mezclas agua-sedimentos naturales se comportan como fluidos newtonianos para concentraciones bajas, en general menores del 1% en volumen (3% en peso); al aumentar la concentración por encima de este límite, la viscosidad se incrementa en forma significativa, además de que su comportamiento pasa a ser no newtoniano; es decir, la viscosidad varía no sólo con la temperatura, sino también con la rapidez de deformación $\dot{\gamma}$. Para el caso unidimensional, considerando la profundidad del flujo, la relación se reduce a la siguiente expresión:

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy}$$

donde la variable u es la velocidad en la dirección principal del flujo y la y es la coordenada vertical. A partir de una cierta concentración, las mezclas adquieren esfuer-

zo de cedencia τ_y ; es decir, hasta que este esfuerzo se supere ocurre el flujo. En la ilustración 1 se muestran los diferentes comportamientos reológicos de los fluidos.

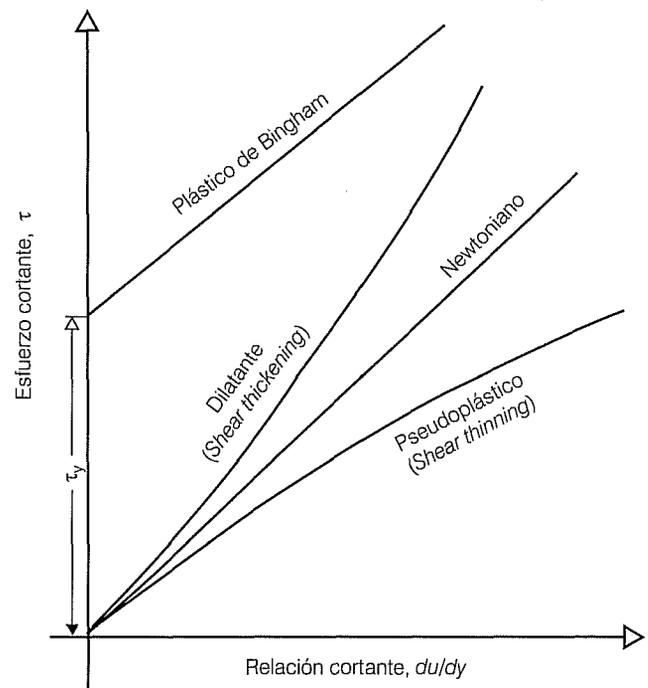
Los modelos más utilizados para las mezclas agua-sedimentos son el plástico de Bingham, el pseudoplástico con esfuerzo de cedencia y, en algunos casos, se adopta el comportamiento de dilatación con esfuerzo de cedencia.

En una etapa anterior (Caldiño y Bonola, 2000), en el IMTA se efectuaron experimentos con viscosímetros capilares comerciales a mezclas agua-arcilla, con concentraciones menores del 11% en volumen (25% en peso). Las viscosidades medidas estuvieron en el rango de 1 a 3 mPa s (cP). Tales concentraciones ensayadas y las viscosidades obtenidas son menores que las máximas de los flujos de *debris*, para los cuales se estiman concentraciones mayores de 70 a 80% en peso (48 a 61% en volumen) (ver Davies *et al.*, 1992), por lo que fue necesario implementar una nueva metodología, a fin de probar mezclas con concentraciones mayores que las ensayadas con anterioridad.

Trabajos experimentales

Las pruebas experimentales se orientaron a encontrar funciones de la viscosidad, así como la variación de tales funciones con las distintas concentraciones.

Ilustración 1. Comportamiento reológico de los fluidos.



El viscosímetro utilizado es de tipo rotacional, modelo RV, analógico, con ocho velocidades de rotación y siete agujas. El rango de viscosidades nominal que puede determinar es de 200 a 8,000,000 mPa s (cP). En la ilustración 2 se muestra el instrumento descrito.

Cuando se pone en funcionamiento el viscosímetro, la aguja inmersa en el fluido dentro del vaso gira con la velocidad prefijada; se toma la lectura en un disco graduado, con escala 1-100. Al multiplicar este valor por un factor que depende del número de la aguja, se obtiene la viscosidad dinámica para esta velocidad angular en mPa.s (cP).

Se verificó el correcto funcionamiento del viscosímetro haciendo una prueba con un fluido estándar, a una temperatura de 25°C, obteniendo un error de 0.068.

Para preparar y ejecutar los experimentos, así como para obtener los parámetros correspondientes, se siguió el procedimiento indicado por la norma ASTM D4016-93.

Preparación de las mezclas agua-sedimentos e inicio de las pruebas

La concentración de arcilla se obtuvo a partir de la proporción arcilla-agua en peso, en un vaso de precipitado de quinientos mililitros.

Los sedimentos utilizados consistieron en una arcilla (pasó la malla núm. 200, $D = 74 \mu\text{m}$) que se encuentra en gran parte del estado de Morelos, con densidad específica de 2.55, y una arena fina de origen volcánico que pasó por la malla 100 ($D = 150 \mu\text{m}$), con densidad específica de 2.58. La arcilla se obtuvo de excavaciones realizadas en las instalaciones del IMTA y la arena se trajo de la sierra del Ajusco.

Todas las mezclas agua-sedimentos se prepararon y ensayaron de la siguiente manera:

- Inicialmente, se definió el peso total de la muestra y se calcularon los pesos del agua y de los sedimentos correspondientes a la concentración deseada. Después, en un vaso de precipitado, se agregaron los sedimentos (previamente secados en el horno a 105°C por al menos 24 horas) al agua hasta obtener el peso total. Finalmente, se procedió a agitar la mezcla por un tiempo de diez a quince minutos, hasta obtener una masa uniforme (considerando que mientras mayor era la concentración, se requería más tiempo de agitación para homogeneizar la muestra).
- Para reducir la evaporación del agua de la mezcla durante la instalación del equipo, fenómeno que modificaría el valor de la concentración, fue necesario instalar y nivelar previamente el viscosímetro; también

Ilustración 2. Viscosímetro Brookfield.



se reguló la temperatura del medio ambiente a $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

- Con el vaso de precipitado y la muestra preparada para ser ensayada en el viscosímetro, se instaló la aguja preseleccionada en este último y se puso en operación el instrumento, verificando que registrara lecturas mayores de diez y menores de noventa en el disco rotatorio, para minimizar errores por operar cerca de los límites (cero y cien).
- Se registraron las lecturas para las diferentes velocidades de rotación, que después se multiplicaron por el factor correspondiente, para obtener la viscosidad dinámica (ASTM D4016-93).

Concentraciones ensayadas

Aunque las características de los flujos de lodos y *debris* en la naturaleza incluyen desde grandes rocas hasta sedimentos finos y otros materiales, la viscosidad del fluido intersticial (mezcla agua-finosa) afecta en mayor grado que la inclusión de los sedimentos granulares; sin embargo, la relación es compleja (Iverson, 1997).

Con la ejecución de las pruebas se midieron, en un rango de concentraciones, los valores de la viscosidad para mezclas de agua-arcilla y de agua-arcilla-arena fina. Los valores obtenidos de las pruebas, complementados con su procesamiento y análisis, representan magnitudes de referencia para alimentar modelos de cálculo.

Con base en los resultados de los experimentos con los viscosímetros capilares (Caldiño y Bonola, 2000), para los que se efectuaron pruebas a mezclas agua-arcilla con concentraciones menores del 11% en volumen, C_v (25%

en peso, C_w), se programaron las concentraciones para realizar las pruebas en el viscosímetro Brookfield, las cuales estuvieron en el rango del 14 al 28% en volumen (30 a 50% en peso) para las mezclas agua-arcilla, y de 24 a 56% en volumen (30 a 71% en peso) para las mezclas agua-arcilla-arena fina (cuadro 1).

Todas las mezclas se elaboraron para cada experimento, excepto en el caso de las tres últimas de agua-arcilla-arena fina del cuadro 1, las cuales se obtuvieron a partir de la mezcla agua-arcilla con concentración del 35% en peso, a las que se agregaron cantidades determinadas de arena fina para obtener diferentes concentraciones de arcilla y de arena fina.

En las ilustraciones 3 y 4 es posible percibir la apariencia de algunas de las mezclas ensayadas.

Debido a que con el viscosímetro Brookfield no es posible obtener en forma directa las funciones reológicas, fue necesario aplicar el procedimiento de Mitchka (1982), que a continuación se describe en forma resumida:

1. Se toman las lecturas α_i para las correspondientes revoluciones por minuto (N) del viscosímetro.
2. Se calcula el esfuerzo cortante τ_i como el producto de las lecturas α_i por un factor $k_{\alpha\tau}$ que depende de la aguja del viscosímetro utilizada en la medición; el factor $k_{\alpha\tau}$ se obtiene de una tabla de la misma referencia (Mitchka, 1982).

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

3. Se dibuja la relación $\text{Log } N_i - \text{Log } \tau_i$ y de la recta de ajuste (esta relación en general sigue una recta); se obtiene la pendiente n .
4. Con la pendiente n y con el número de aguja se obtiene otro factor ($k_{N\dot{\gamma}}$) que se multiplica por N_i para obtener la rapidez de deformación

$$\dot{\gamma}_i = k_{N\dot{\gamma}} N_i$$

A continuación se incluye un ejemplo para la concentración de arcilla C_w del 35%, que ilustra el procedimiento mencionado (ver cuadro 2).

1. La viscosidad se obtiene del producto de la lectura en el disco α , por el factor de la aguja correspondiente.
2. El esfuerzo cortante (τ) resulta de multiplicar la lectura (α_i) por el factor $k_{\alpha\tau} = 0.119$ (aguja 2).
3. Se dibujó la relación $\text{Ln } \tau - \text{Ln } N$ para obtener la pendiente n de la recta de ajuste (ilustración 5).

Ilustración 3. Consistencia de la mezcla agua-arcilla.

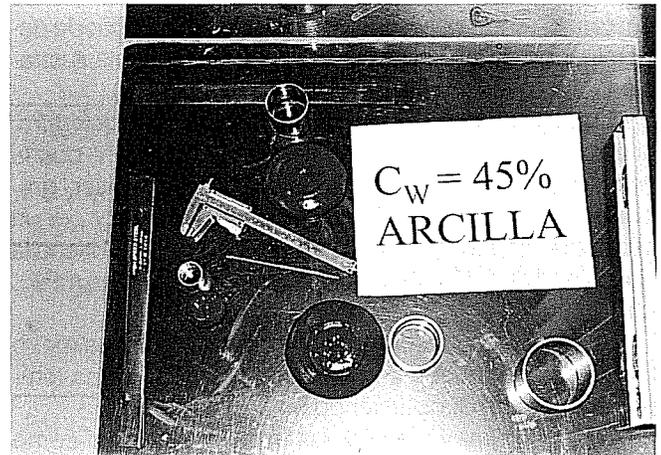
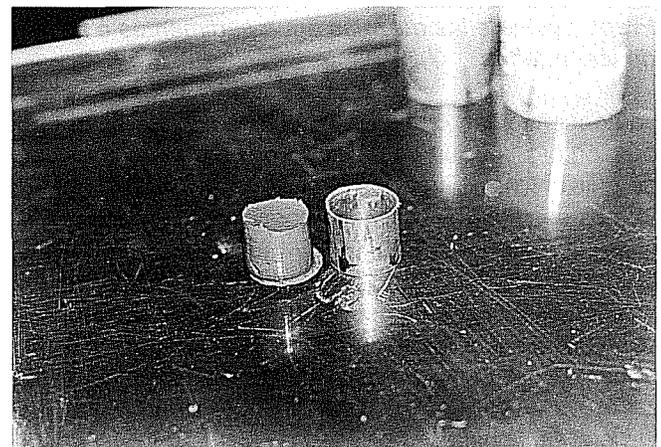


Ilustración 4. Consistencia de una concentración de arcilla del 50%.



4. Con la pendiente n y el número de aguja se obtuvo el factor ($k_{N\dot{\gamma}}$), que se multiplica por N_i para calcular la rapidez de deformación. En este caso, el factor se ajustó para obtener la rapidez de deformación como τ/μ ; el factor utilizado fue $k_{N\dot{\gamma}} = 0.2975$.

En la ilustración 5 se muestran en forma gráfica las funciones de viscosidad obtenidas con este procedimiento.

Análisis de resultados

La aplicación del procedimiento descrito con las diferentes concentraciones de arcilla y arena arrojó los resultados que se indican en la ilustración 5, la cual contiene las relaciones reológicas $\dot{\gamma} - \mu$ y $\dot{\gamma} - \tau$, que se ajustaron a las expresiones que se señalan en los cuadros 3 y 4.

En la ilustración 6 se observa el incremento de la viscosidad con la concentración; al aumentar la rapidez de deformación disminuye la viscosidad, lo cual sugiere un comportamiento pseudoplástico con esfuerzo de cedencia; esto se confirma con las relaciones $\dot{\gamma} - \tau$.

La inclusión de arena fina provocó un incremento notorio de la viscosidad; por ejemplo, para una concentración de arcilla del 30% en peso, la máxima viscosidad medida fue de 2,200 mPa s, mientras que con el 16.7% de arcilla y 33.1% de arena, ambas en peso, la viscosidad resultó de 3,200 mPa s.

La viscosidad máxima medida para mezclas agua-arcilla-arena fue de 56,000 mPa s para la concentración en peso 17.2 a 51% arcilla-arena (total, $C_{SW} = 68.2\%$); para C_{SW} total del 86.1% (14 a 72.1% arcilla-arena), la

viscosidad fue de 15,200 mPa s. Con esta comparación se observa la influencia de la arena, aunque no se pueda definir una función.

Para mezclas agua-arcilla con la máxima concentración ensayada ($C_W = 50\%$), se midió una viscosidad de 1,040,000 mPa s, mientras que para la combinación de 17.2 a 51% arcilla-arena ($C_{SW} = 68.2\%$), la viscosidad máxima resultó de 56,000 mPa s para la velocidad de rotación, 0.5 rpm.

Las viscosidades máximas corresponden a la mínima rapidez de deformación, relacionada con la mínima velocidad de rotación, 0.5 ($\dot{\gamma} < 0.2 \text{ s}^{-1}$ para esta serie de experimentos), que proporciona el viscosímetro Brookfield; en condiciones de campo, se han reportado valores de $\dot{\gamma}$ en el rango de 1 a 10 s^{-1} para flujos altamente concentrados (Phillips y Davies, 1991).

Cuadro 1. Concentraciones agua-sedimentos-ensayadas.

Agua-arcilla		Agua-arcilla-arena					
C_W	C_V	$C_{W \text{ arcilla}}$	$C_{W \text{ arena}}$	$C_{V \text{ arcilla}}$	$C_{V \text{ arena}}$	C_{SW}	C_{SV}
30	14.2	14	72.1	6	50	86.1	56
35	17.3	14.3	42.85	6.1	22.5	57.15	28.6
40	20.5	16.2	67.6	7.1	44.7	83.8	51.8
50	27.9	16.7	33.3	7.3	16.2	50	23.5
		17.2	51	7.5	28.8	68.2	36.3
		20.3	42.3	9.1	22.1	62.6	31.2
		25.9	25.9	12.1	11.9	51.85	24

C_{SW} = concentración total de sólidos en peso.
 C_{SV} = concentración total de sólidos en volumen.

Cuadro 2. Obtención de las funciones reológicas de la mezcla para $C_W = 35\%$.

N rpm	Lectura α_i	Factor aguja 2	Viscosidad μ mPa s	Esfuerzo cortante τ Pa	$\ln N$	$\ln \tau$	Rapidez de deformación $\dot{\gamma}$
0.5	8.5	800	6,800	1.011	-0.6931	0.0114	0.1487
1.0	10.0	400	4,000	1.190	0	0.1739	0.2975
2.5	15.0	160	2,400	1.785	0.9162	0.5794	0.7437
5.0	16.0	80	1,280	1.904	1.6094	0.6439	1.4875
10.0	18.0	40	720	2.142	2.3025	0.7617	2.9750
20.0	24.0	20	480	2.856	2.9957	1.0494	5.9500
50.0	35.0	8	280	4.165	3.9120	1.4267	14.8750
100.0	47.0	4	188	5.593	4.6051	1.7215	29.7500

Cuadro 3. Expresiones de las mezclas agua-arcilla.

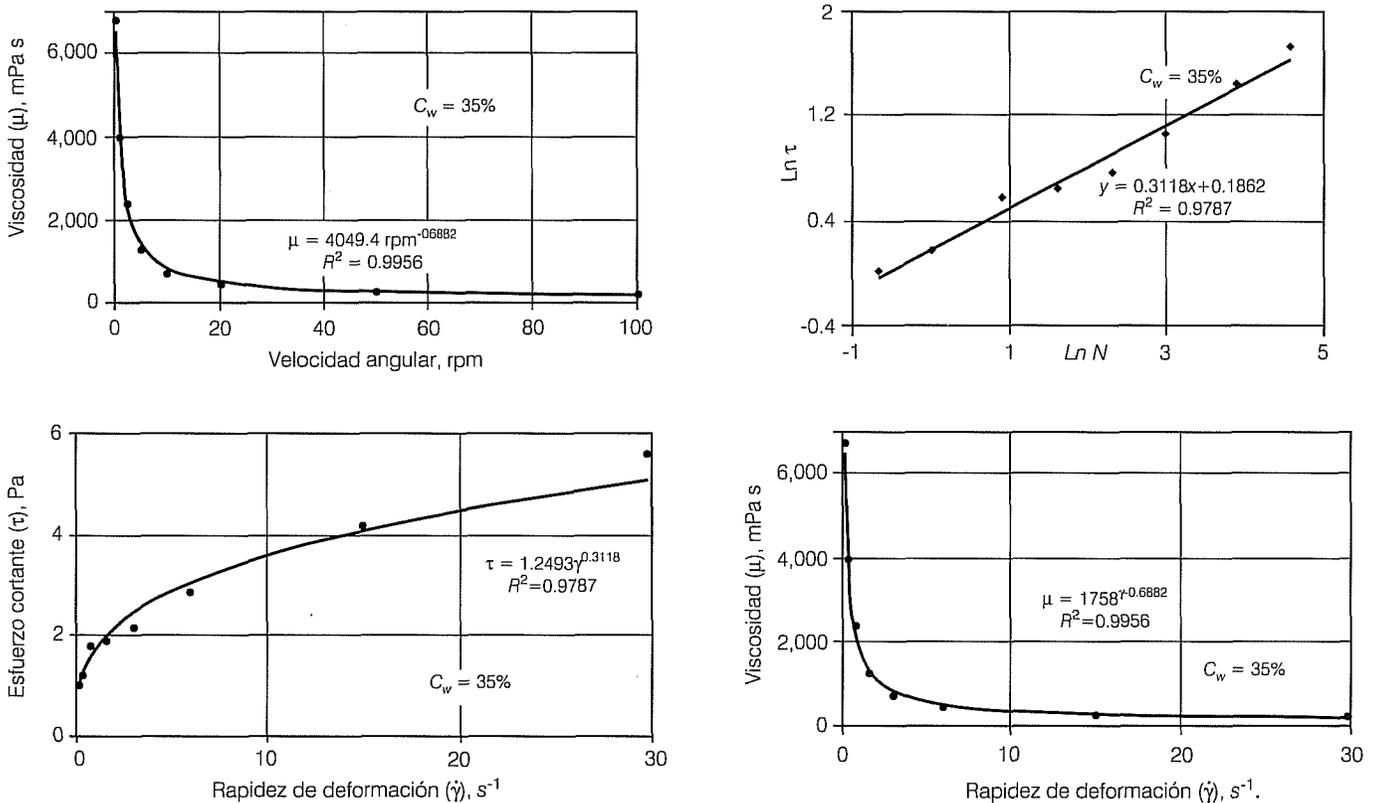
$C_{W \text{ arcilla}} \%$	$C_{V \text{ arcilla}} \%$	Funciones reológicas			
		μ	R^2	τ	R^2
30	14.2	$753 \dot{\gamma}^{0.6815}$	0.9944	$0.3551 \ln \dot{\gamma} + 0.6201$	0.8948
35	17.3	$1758 \dot{\gamma}^{0.6882}$	0.9956	$1.2493 \dot{\gamma}^{0.3118}$	0.9787
40	20.5	$10650 \dot{\gamma}^{0.665}$	0.9784	$6.6253 \dot{\gamma}^{0.4875}$	0.8758
50	27.9	$127513 \dot{\gamma}^{0.8531}$	0.9633	$104.48 e^{0.0519\dot{\gamma}}$	0.8546

Cuadro 4. Expresiones de las mezclas agua-arcilla-arena.

C_w arcilla %	C_v arena %	Funciones reológicas			
		μ	R^2	τ	R^2
14	72.1	$6323.9 \dot{\gamma}^{-0.4379}$	0.9650	$6.3568 \ln \dot{\gamma} + 9.6236$	0.9166
14.3	42.85	$3046.7 \dot{\gamma}^{-0.7618}$	0.9901	$3.0467 \dot{\gamma}^{0.2382}$	0.9069
16.2	67.6	$3836.3 \dot{\gamma}^{-0.4382}$	0.8951	$3.6124 \ln \dot{\gamma} + 6.0376$	0.9233
16.7	33.3	$701.73 \dot{\gamma}^{-0.7741}$	0.9902	$0.3551 \ln \dot{\gamma} + 0.6201$	0.8948
17.2	51	$24801 \dot{\gamma}^{-0.2806}$	0.7211	$24.995 \dot{\gamma}^{0.6809}$	0.9700
20.3	42.3	$10182 \dot{\gamma}^{-0.4056}$	0.9341	$3.7817 \dot{\gamma}^{0.4923}$	0.9634
25.9	25.9	$3128.5 \dot{\gamma}^{-0.5806}$	0.9850	$3.1285 \dot{\gamma}^{0.4194}$	0.9717

C_w y C_v son las concentraciones en peso y en volumen, respectivamente, en porcentaje.
 rpm = revoluciones por minuto, velocidad rotacional.
 μ = viscosidad dinámica; se obtiene de la lectura del disco, multiplicada por un factor.
 C_{sw} = concentración total de sólidos (arcilla + arenas).
 R^2 = coeficiente de determinación.
 $\dot{\gamma}$ = rapidez de deformación.

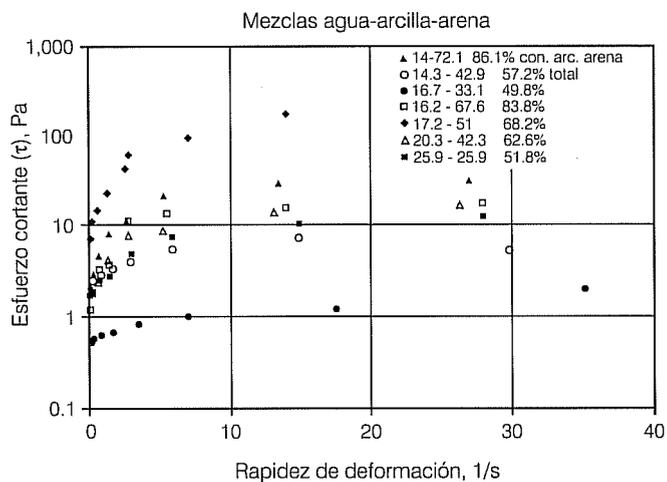
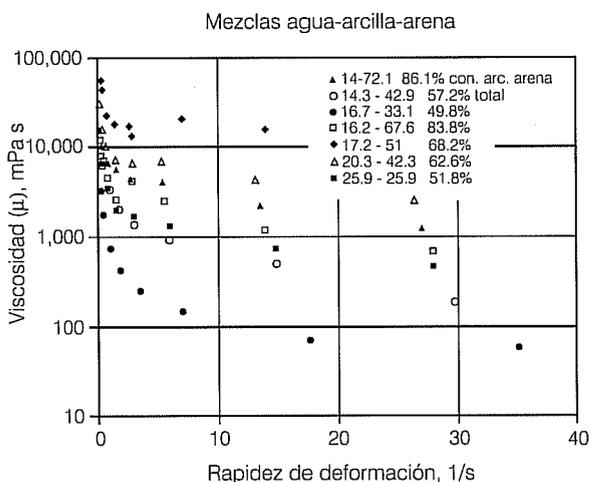
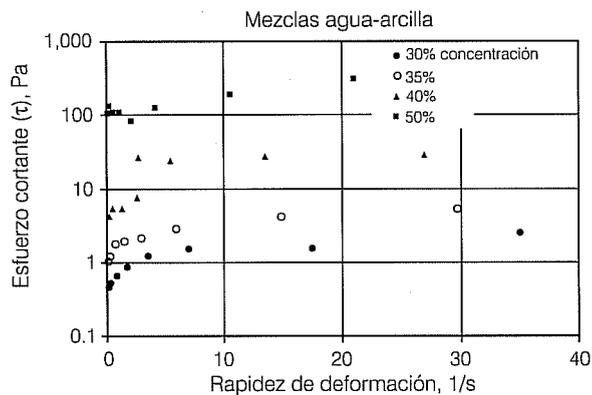
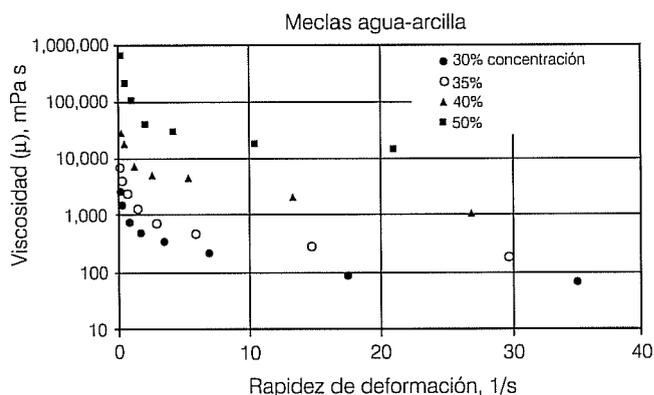
Ilustración 5. Procedimiento gráfico para obtener las funciones reológicas.



Las tendencias de los parámetros reológicos observadas son similares a las que se reportan en otros estudios; por ejemplo, Julien y Lan (1991), Coussot y Boyer (1995), y Coussot (1997) muestran que los valores son del mismo orden. Cabe desta-

car la sencillez y bajo costo del instrumento utilizado en el presente trabajo, en comparación con los reómetros desarrollados *ex professo* (ello sin dejar de reconocer las grandes e invaluable aportaciones de estos últimos).

Ilustración 6. Relaciones reológicas obtenidas.



Además, se obtuvieron relaciones concentración en volumen-viscosidad para las diferentes velocidades angulares; el ajuste a funciones potenciales resultó muy bueno, con coeficientes de determinación mayores que 0.98 en todos los casos; asimismo, el valor de los exponentes en promedio fue de 8.3 (ver ilustración 7).

Conclusiones

A partir de los trabajos descritos, se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada funciones reológicas de las mezclas agua arcilla, mismas que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos.

El rango de aplicación del viscosímetro Brookfield utilizado (para mezclas agua-sedimentos con los materiales ensayados) se limita a concentraciones máximas del 50% en peso, con arcilla y concentraciones totales del 86% en peso (14% de arcilla). Con concentraciones de

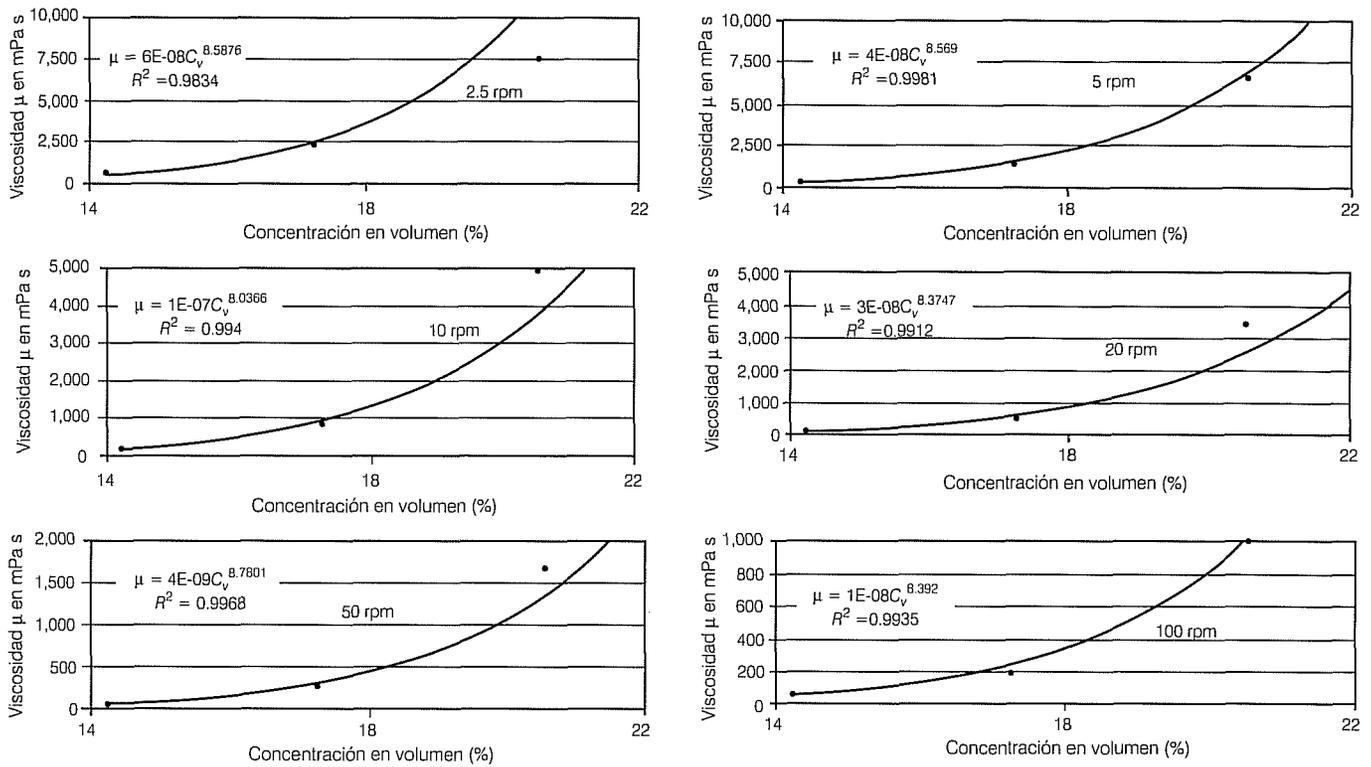
arcilla menores del 25% en peso no se registran lecturas y con arena (sin arcilla) no se puede sostener esta última en suspensión en las condiciones descritas de los experimentos.

Se corroboró el incremento de la viscosidad con la concentración tanto para mezclas agua-arcilla como para agua-arcilla-arena. En las primeras, las mediciones se ajustaron en forma excelente a funciones de potencia, mismas que pueden alimentar modelos de cálculo de estos flujos.

En el caso de las mezclas agua-arcilla-arena —aunque es evidente el incremento de la viscosidad con relación a la mezcla agua-arcilla, fijando el peso de la arcilla—, no se identificó en forma clara para estos experimentos alguna función o tendencia de cómo influye la concentración de la arena. Es conveniente que se continúe investigando al respecto, ya que además pueden definirse muchas combinaciones.

De acuerdo con las mediciones y su análisis, estas mezclas se identificaron como fluidos no newtonianos,

Ilustración 7. Relaciones concentración-viscosidad para las mezclas agua-arcilla ensayadas.



con comportamiento pseudoplástico y esfuerzo de cedencia.

El método de Mitchka es una herramienta útil y práctica para el cálculo de las funciones de viscosidad a partir del viscosímetro Brookfield, un instrumento de operación sencilla y con un rango que comprende valores similares a los de campo. Aunque las concentraciones ensayadas son altas, aún son menores que las máximas ocurridas en la naturaleza y por las características de los lodos y *debris* no se pueden ensayar con equipos comerciales. Tal limitación indica que deben continuar los trabajos de investigación sobre prototipos experimentales que permitan ensayar muestras que incluyan arenas gruesas y pequeñas gravas.

Los valores de los parámetros reológicos medidos resultaron similares a los medidos para muestras de lodos y *debris* de otras regiones.

Recibido: 18/06/2001
Aprobado: 11/07/2001

Referencias

Caldiño, V.I. y A.I. Bonola, *Viscosidad de mezclas agua arcilla en relación con los flujos de lodos y debris*, XIX Congreso

Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina, 2000, pp. 717-726.

Coussot, P. y S. Boyer, "Determination of Yield Stress Fluid Behavior from Inclined Plane Test", *Rheologica Acta*, vol. 34, núm. 6, 1995, pp. 534-543.

Coussot, P., *Mudflow Rheology and Dynamics*, IAHR, Monograph Series, Rotterdam, 1997, 255 pp.

Davies, T.R., A.J. Phillips y X.B. Zhang, "Debris Flow Behavior—An Integrated Overview", *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*, núm. 209, IAHS Publ. 1992, pp. 217-225.

Iverson, R., "The Physics of Debris Flows", *Reviews of Geophysics*, vol. 35, núm. 3, agosto de 1997, pp. 245-296.

Mitchka, P., "Simple Conversion of Brookfield R.V.T. Readings Into Viscosity Functions", *Rheologica Acta*, vol. 21, 1982, pp. 207-209.

Phillips, C.J. y R.H. Davies, "Determining Rheological Parameters of Debris Flow Material", *Geomorphology*, vol. 4, Elsevier Science Publishers, B.V., Amsterdam, 1991, pp. 101-110.

Julien, P. y Y. Lan, "Rheology of Hyperconcentrations", *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 117, núm. 3, 1991, pp. 346-353.

Abstract

Caldiño Villagómez, I.A., I. Bonola Alonso & G. Salgado Maldonado, "Laboratory Determination of the Rheological Parameters of Water-Sediment Mixtures for the Calculation of Sludge and Debris Flows", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVII, num. 3, pages 27-35, July-September, 2002.

Sludge and debris flows have caused multiple economic and human losses in several parts of the world, including Mexico, where states such as Guerrero, Puebla, Chiapas and the State of Mexico have suffered the severe consequences of this phenomenon.

In order to establish prediction and subsequent prevention measures, numerical models have been developed that require knowing the rheological parameters of water-sediment mixtures. To have a better understanding of the influence of these mixtures, it is necessary to observe and analyze them based on experimental tests, and, if possible, in a field situation under real conditions, which implies difficulties and risks due to the nature of the phenomenon. Based on these tools, we have now some advances in the knowledge of the behavior of these flows, which are of the non-Newtonian type, and their general treatment considers viscosity and yield stress functions in its calculation.

The Mexican Institute of Water Technology (IMTA) carried out viscosity measurements using two commercially-available capillary viscometers, limited, due to their physical characteristics, to water-clay mixtures with concentrations of less than 11% in volume (25% in weight), the results have been previously elsewhere reported. This article presents the results of tests made with a Brookfield viscometer using water-clay and water-fine sand mixtures with concentrations greater to those mentioned above.

The clay used for the tests was taken from soils located in vast areas in the State of Morelos (Chichinautzin Group), which have a soft to firm consistency and a high plasticity with expansive characteristics, are dark gray in color, and have a specific density of 2.55. The granular material used is uniform fine sand (passes through a No. 100 mesh) of volcanic origin, collected from the Ajusco region, of black color and with a specific density of 2.58.

In order to obtain the rheological functions of deformation rate-viscosity and deformation rate-shearing stress, Mitchka's procedure was used, since it is not possible to obtain them directly due to the limitations of the Brookfield viscometer.

Using the above-mentioned procedure, the relationships of the mixtures were determined at different concentrations. These relationships can be used in numeric simulation models in order to calculate the behavior of these flows in several zones of Mexico with similar sediment characteristics.

Key words: mud flow, rheological parameters of water-sediment mixtures.

Dirección institucional de los autores:

Ignacio A. Caldiño Villagómez
Isaac Bonola Alonso
Gilberto Salgado Maldonado

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos
C.P. 62550
México.

Correos electrónicos: icaldino@tlaloc.imta.mx, ibonola@tlaloc.imta.mx, gsalgado@tlaloc.imta.mx.