

DISPOSITIVO DE REYNOLDS PARA EL ESTUDIO REOLÓGICO DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS PRELIMINARES

Luis Fernando Ospina H.^{*1}, María Esperanza López G.²,
Carlos Alberto Palacio³, José Fernando Jimenez M.⁴

¹ Ing. de Materiales Universidad de Antioquia, Estudiante Maestría en Recursos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

² Doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales, Profesora, Departamento de Ingeniería de Materiales, Grupo GIPIMME, Universidad de Antioquia, Medellín.

³ Ph. D. Carlos Alberto Palacio, Profesor Asociado Universidad de Antioquia, Medellín.

⁴ Magister José Fernando Jiménez Mejía, Profesor Asociado Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

*Contacto: Cra. 80 No. 65-223, Bloque M2 Oficina 301, Medellín, Colombia,
teléfono 57(4) 4255000; lfospina@unal.edu.co

Resumen

Se implementó un dispositivo de Reynolds que permitió realizar un estudio reológico a fluidos no Newtonianos independientes del tiempo. El objetivo de fue la construcción de un dispositivo sencillo y de bajo costo que sirva para desarrollar trabajos de investigación y docencia en la caracterización de este tipo de fluidos. La experimentación se realizó con carboximetil celulosa disuelto en agua en concentraciones de 0.25, 0.50, 0.75 y 1.0 % P/P y caolín en suspensión en concentraciones del 1, 2, 3, 5 y 10 % P/P. Se caracterizó los materiales de estudio en estado sólido por técnicas de difracción de rayos X, espectroscopia electrónica de barrido y distribución de tamaño de partícula. En la caracterización reológica se utilizó el modelo de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed (ley de potencia generalizado) por la ventaja que presenta de que todas las variables se pueden medir en laboratorio. El índice de consistencia al flujo para las diferentes concentraciones arrojó valores mayores que 1 para el carboximetil celulosa, y menores que 1 para el caolín, los coeficientes de determinación en los gráficos de $\Delta p/L$ dieron mayores del 95%. Los resultados muestran que se da un comportamiento pseudoplástico para el carboximetil celulosa y dilatante para el caolín. A su vez los resultados confirman que el dispositivo desarrollado en esta investigación es una buena alternativa confiable y económica para realizar estudios reológicos para fluidos no Newtonianos independientes del tiempo.

Palabras clave: Reología, carboximetil celulosa, caolín, viscosímetro.

1. Introducción

En este artículo se presenta el diseño y construcción de un dispositivo sencillo y de bajo costo que sirve para desarrollar trabajos de investigación y docencia en la caracterización de fluidos no newtonianos independientes del tiempo, útil para la industria minero-metalúrgica y otras industrias que manejan suspensiones a nivel del procesamiento de los materiales. Se presenta la conformación de alternativas físicas para elaborar el dispositivo, los principios que fundamentan el comportamiento reológico, una caracterización básica de los materiales de la experimentación por técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y distribución de tamaño de partícula (DTP), y los reogramas obtenidos.

El transporte de fluidos no Newtonianos en tuberías tiene un campo de aplicación muy amplio, transporte de: lodos de perforación, materiales compuestos de cementos y pastas, caolín en suspensión, etc (Aguirre et. al., 2005), por lo cual se debe de caracterizar reológicamente el fluido para obtener un buen diseño (Blasco, 2006). En el dispositivo construido, dada una tubería de sección recta circular, se determinó el reograma de un fluido estudiando la relación entre la tensión tangencial τ y la velocidad de deformación angular $\dot{\gamma}$ de modo que a efectos prácticos el reograma del fluido estudiado es la curva dada para $\tau = f(\dot{\gamma})$ (Naranjo, 1999).

En general, para fluidos no newtonianos independientes del tiempo se puede considerar válida la ecuación de Ostwald -De Waele (UPC, 2004)

$$\tau = k (\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

El alto costo de los reómetros (Direct Industry, 2010) utilizados para la caracterización reológica de los fluidos se convierte en una limitación para estos estudios, los cuales son de gran importancia en la industria minero-metalúrgica y otras industrias que manejan suspensiones a nivel del procesamiento de los materiales (Astarita, 1967). Esto se realizó mediante el estudio del flujo en un dispositivo de Reynolds, el cual ha sido usado convencionalmente para establecer la transición del flujo laminar a turbulento en el caso de fluidos newtonianos (Macosko, 1994).

Se experimentó con Carboximetil Celulosa - CMC en agua (Maestro, 2002) en concentraciones de 0.25, 0.5, 0.75 y 1.0 % y caolín en suspensión (Castro & Toro 1992) en concentraciones de 1, 2, 3, 5 y 10 %. Se realizó 12 ensayos para cada concentración en los cuales se midió caudal vs $\Delta p/L$ y temperatura, se garantizó durante los ensayos un nivel constante de alimentación del sistema por medio de una recirculación con una bomba sumergible instalada al final del dispositivo. Se realizaron los cálculos utilizando el modelo reológico de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed (UPC, 2004). Se caracterizaron los materiales de estudio por SEM, EDX y DTP. El desarrollo de esta investigación se realizó de la siguiente manera: En la primera parte se presenta los materiales y métodos utilizados, en la segunda parte se presenta los parámetros para el diseño construcción del dispositivo

de Reynolds, en la tercera parte se presentan los resultados experimentales, en la cuarta parte se dan las conclusiones. Finalmente los resultados muestran un comportamiento pseudoplástico para el CMC y un comportamiento dilatante par el colín (Hermelin & Ochoa, 1998).

2. Materiales y Métodos

Conformación de alternativas físicas del dispositivo: Se seleccionó un diámetro 4.24 cm. (comercial) en la tubería horizontal, al final de ésta se instaló una válvula que permitió controlar el caudal. El diámetro para los piezómetros se seleccionaron de 2.54 cm., instalados a distancias de 1 metro (Figura 1A), el cilindro de alimentación de fluido se fabricó en un diámetro de 38 cm, estas dimensiones garantizan que no se presenten problemas de capilaridad y tensión superficial, además permite una fácil limpieza y mantenimiento del dispositivo. Se construyó un sistema de rebose en la parte superior del cilindro para garantizar un nivel constante. A 30 cm. de la parte inferior se instaló un falso fondo con perforaciones de 1.9 cm que sirvió como disipador de energía a la entrada de la tubería horizontal. La configuración final que se obtuvo en la construcción se muestra en la Figura 1B.

A.

B.

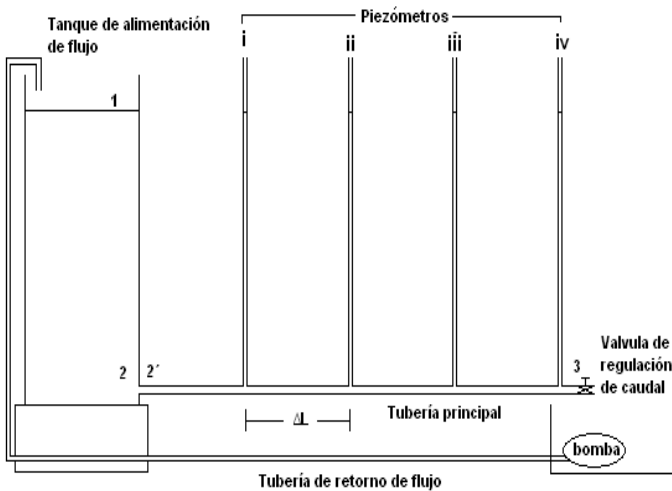


Figura 1. Esquema del dispositivo de Reynolds, A esquema de diseño, B dispositivo final.

Se estudiaron varias posibilidades de materiales para la construcción del dispositivo, acero, fibra de vidrio y acrílico (Figura 2), seleccionando la configuración de acrílico debido a la ventaja que presenta de ser transparente, lo que ayuda a visualizar el comportamiento del flujo.

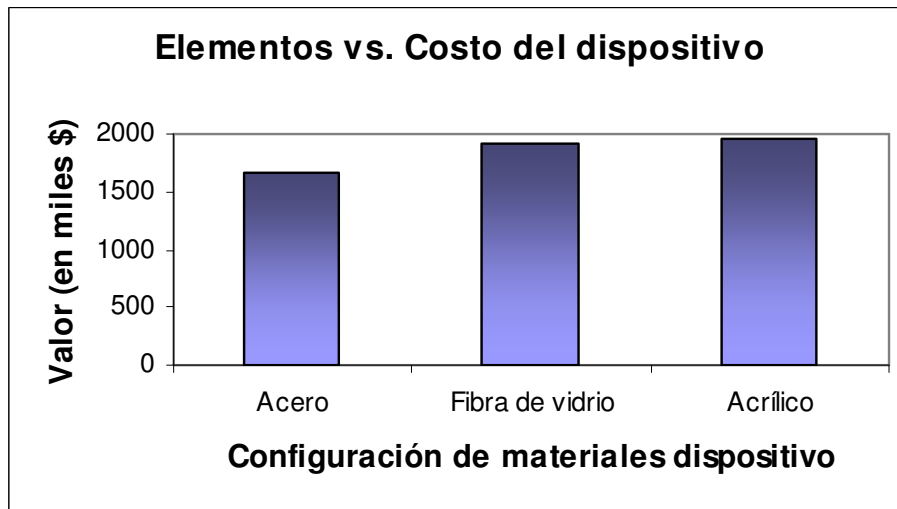


Figura 2. Comparación de precios de diferentes materiales para la construcción del viscosímetro.

Se caracterizó el CMC y al caolín por medio de microscopia electrónica de barrido (SEM) en equipo JEOL JSM 5910LV con espectrómetros EDS y WDS del Laboratorio de Microscopia avanzada de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, difracción de rayos X (DRX) en equipo Panalytical X PERT PRO MPD del Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín y distribución de tamaño de partícula (DTP) en equipo marca COULTER, modelo LS -130 del laboratorio de Petróleos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Se midió para diferentes aperturas de la válvula del dispositivo, el caudal y las alturas en los piezómetros. El procedimiento consistió en medir para una serie de 12 ensayos por concentración, el caudal Q, en forma volumétrica, el cual fluye por la tubería horizontal del dispositivo y las alturas piezométricas, con estas variables se calculó y determinó el reograma del fluido (UPC, 2004). Durante el proceso se realizó la medición del pH y la temperatura para verificar que no hubiese cambios significativos que alteraran los resultados.

3. Ecuación fundamental que rige el movimiento del fluido en el dispositivo.

Aplicando la ecuación de conservación de energía (Castro & Toro, 1992) en el esquema que se ilustra en la figura 1, entre 1 y 2, 2 y 2' y 2' y 3, con V_1 despreciable en comparación a V_3 , resulta:

$$\rho gh - \frac{1}{2} \rho V_2^2 (\infty - k) = \frac{fL}{2R} \frac{1}{2} \rho V_2^2 = \gamma h_f = \Delta P \quad (2)$$

donde:

∞ : Factor de Coriolis del flujo a la salida de la pipeta.
 K: Coeficiente de pérdida local a la entrada de la tubería.
 f: Factor de fricción de Darcy – Weisbach.
 V: Velocidad del Flujo.

Modelo Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed.

En la práctica los reogramas de muchos fluidos han demostrado tener un comportamiento que no se ajusta al de los modelos ideales, lo cual se refleja en curvas logarítmicas de esfuerzo – tasa de deformación. Para obviar esta dificultad Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed (UPC, 2004) propusieron que la ley potencial fuera definida en función de la velocidad media del flujo. Así, dada una tubería de sección recta circular, el reograma de un fluido estudiando es la relación entre la tensión tangencial τ y la velocidad de deformación angular $\dot{\gamma}$, $\tau = f(\dot{\gamma})$. Para fluidos no newtonianos independientes del tiempo la ecuación de Ostwald -De Waele es válida, donde k el índice de consistencia, el cual es directamente proporcional a la viscosidad del fluido y n es el índice de comportamiento Newtoniano de un fluido (Naranjo, 1999):

$$\tau = k (\dot{\gamma})^n \quad (3)$$

Los estudios de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed sugieren unas expresiones válidas para fluidos no newtonianos independientes del tiempo en la cual todas las variables pueden ser medidas en laboratorio (UPC, 2004):

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4 L} = f \left(\frac{8 u}{D} \right) \quad (4)$$

Donde:

D: Diámetro de la tubería.

ΔP : Diferencia de presión en los piezómetros.

L: Longitud de la tubería.

u: Velocidad media del flujo.

4. resultados y discusión

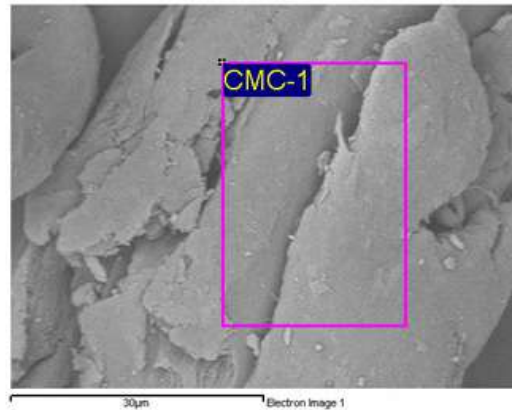
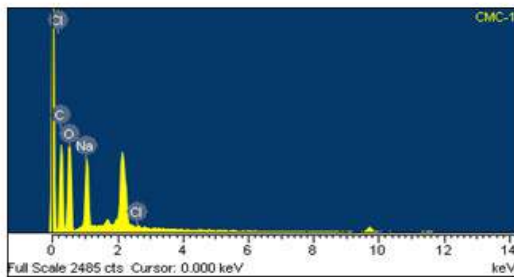
Caracterización mineralógica CMC: En el ensayo SEM (Figura 3), se observa cristales de forma cilíndrica y hojuelas, muestra la composición química del CMC, presenta porcentajes de 42.07% de oxígeno, 43.17% de carbono y 13.89% de sodio. Los principales compuestos coinciden con la fórmula química encontrada en la literatura (López, 2002).

Spectrum processing:
Peaks possibly omitted: 1.660, 2.142, 9.699, 11.536 keV

Processing option: All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard:
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM
Cl KCl 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	42.07	51.29
O K	43.17	39.51
Na K	13.89	8.85
Cl K	0.87	0.36
Totals	100.00	



Comment: Trabajo de grado Luis Fernando Ospina H. Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia.



Figura 3. SEM de CMC

El ensayo DRX reporta una composición muy amorfa (Figura 4). Es difícil tener una idea clara acerca de los resultados obtenidos mediante este ensayo.

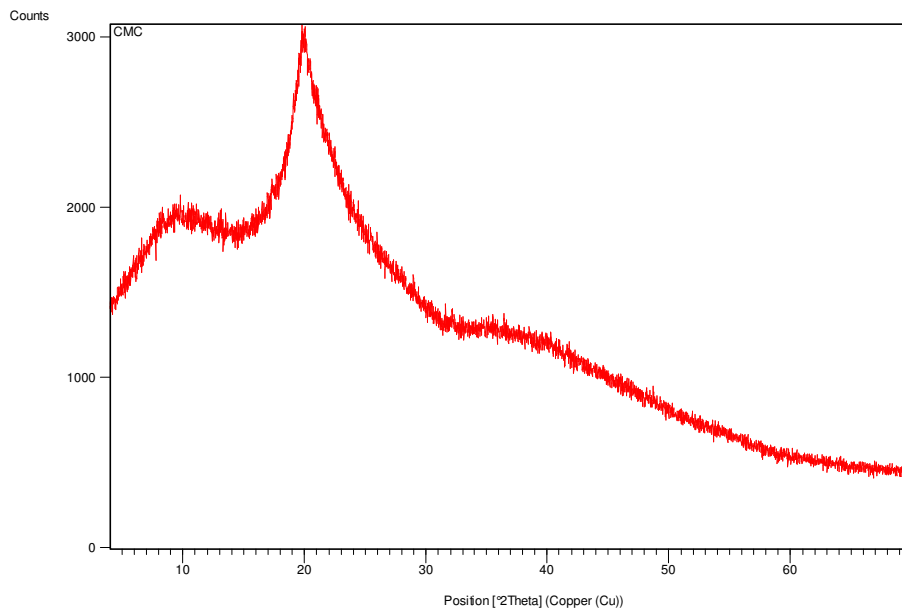


Figura 4. DRX de CMC.

El ensayo DTP (Figura 5) arroja resultado en el cual se observa que para esta muestra se obtiene un tamaño promedio de 23.97 μm , el tamaño de partículas varía entre 0.01 y 120.5 micrómetros. El 10% de las partículas es menor de 2.19 μm , el 25% es menor a 7.97 μm , el 50% es menor a 19.26 μm y el 90% menor a 52.80.

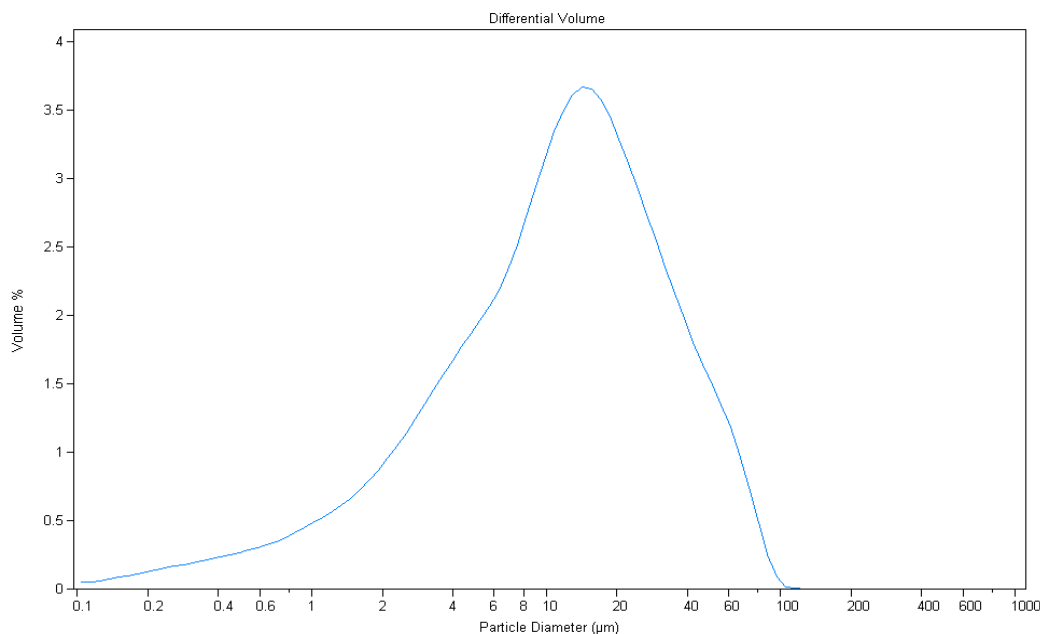


Figura 5. Distribución del tamaño de partícula CMC.

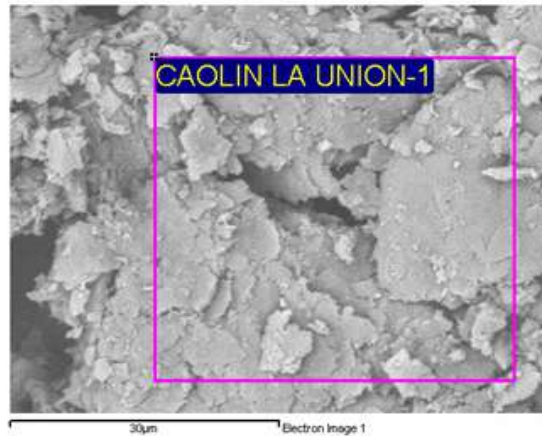
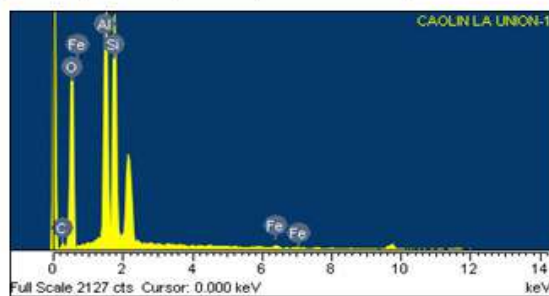
Caracterización mineralógica del caolín: En el ensayo SEM (Figura 6) se observa la estructura con forma irregular con partículas aglomeradas en forma de hojuelas (Restrepo & Sancho, 2004). Los principales compuestos coinciden con la fórmula química encontrada en la literatura (Vásquez et. al., 2009), presenta porcentajes en peso de 26.68% de silicio, de 21.10% de aluminio y 45.94% de oxígeno. Se encontraron también elementos como el carbono 4.79% y el hierro 1.49% posiblemente como impurezas.

Spectrum processing:
Peaks possibly omitted: 2.145, 2.424, 9.703 keV

Processing option: All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard:
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	4.79	7.94
O K	45.94	57.10
Al K	21.10	15.55
Si K	26.68	18.89
Fe K	1.49	0.53
Totals	100.00	



Comment: Trabajo de grado de Luis Fernando Ospina H. Ingeniería de Materiales. Universidad de Antioquia.



Figura 6. SEM del caolín.

El ensayo DRX (Figura 7) muestra el difractograma del caolín. Se observan los picos representativos principalmente de caolinita, con una contribución minoritaria de cuarzo, cristobalita, tridimita, dolomita, moscovita, cuarzo, haloisita e illita, confirmando que contiene impurezas (Vásquez et.al., 2009).

La Tabla 1 muestra los diferentes elementos encontrados en el ensayo DRX y su fórmula química. Se puede apreciar compuestos como moscovita, haloisita, cuarzo y caolinita.

Ref. Code	Nombre del compuesto	Formula química
00-007-0042	Muscovite-3T	(K , Na) (Al , Mg , Fe) ₂ (Si _{3.1} Al _{0.9}) O ₁₀ (O H) ₂
01-070-3755	Quartz	Si O ₂
00-013-0375	Halloysite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (O H) ₄
00-026-0911	Illite-2M1 (NR)	(K , H ₃ O) Al ₂ Si ₃ Al O ₁₀ (O H) ₂
01-072-2300	Kaolinite 1A	Al ₂ Si ₂ O ₅ (O H) ₄

Tabla 1. Lista de elementos encontrados en el DRX para el caolín.

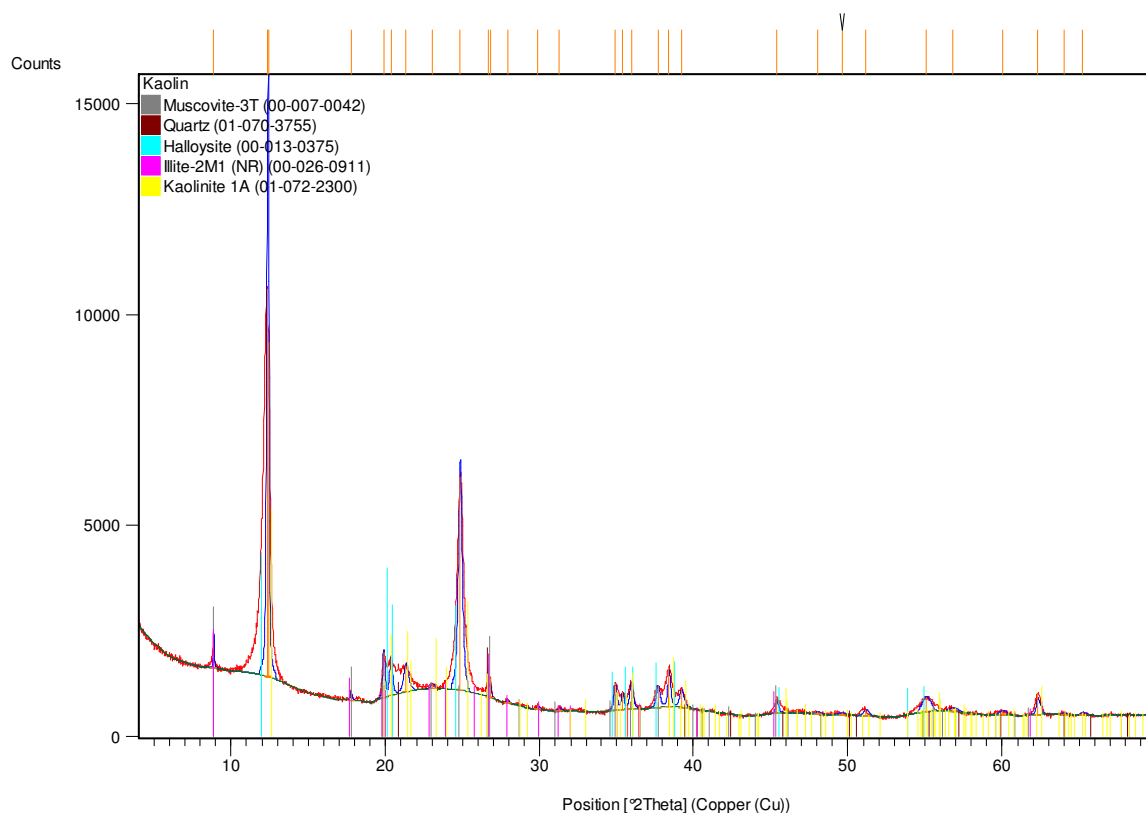


Figura 7. DRX del caolín.

En el ensayo DTP (Figura 8) se observa un tamaño promedio de 30.89 μm , el tamaño de partículas varía entre 0.01 y 112.4 μm . El 10% de las partículas es menor de 3.04 μm , el 25% es menor a 9.88 μm , el 50% es menor a 22.47 μm y el 90% menor a 72.82.

Caracterización reológica CMC: Los cálculos de los reogramas se realizaron con base al modelo de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed (UPC, 2004). Las curvas de $\Delta P/L$ en función de la longitud acumulada para los diferentes caudales se presentan en la Figura 9, siendo el caudal 1 el mínimo y el caudal 12 el máximo. El incremento en las pendientes se da debido a las pérdidas longitudinales de energía y éstas debido al caudal. Este comportamiento lineal se presenta en todos los ensayos ocasionado por las mismas razones. En la Figura 18 se observa el comportamiento lineal que se da entre la cabeza de presión y la longitud, lo que indica que $\Delta P/L$ es constante.

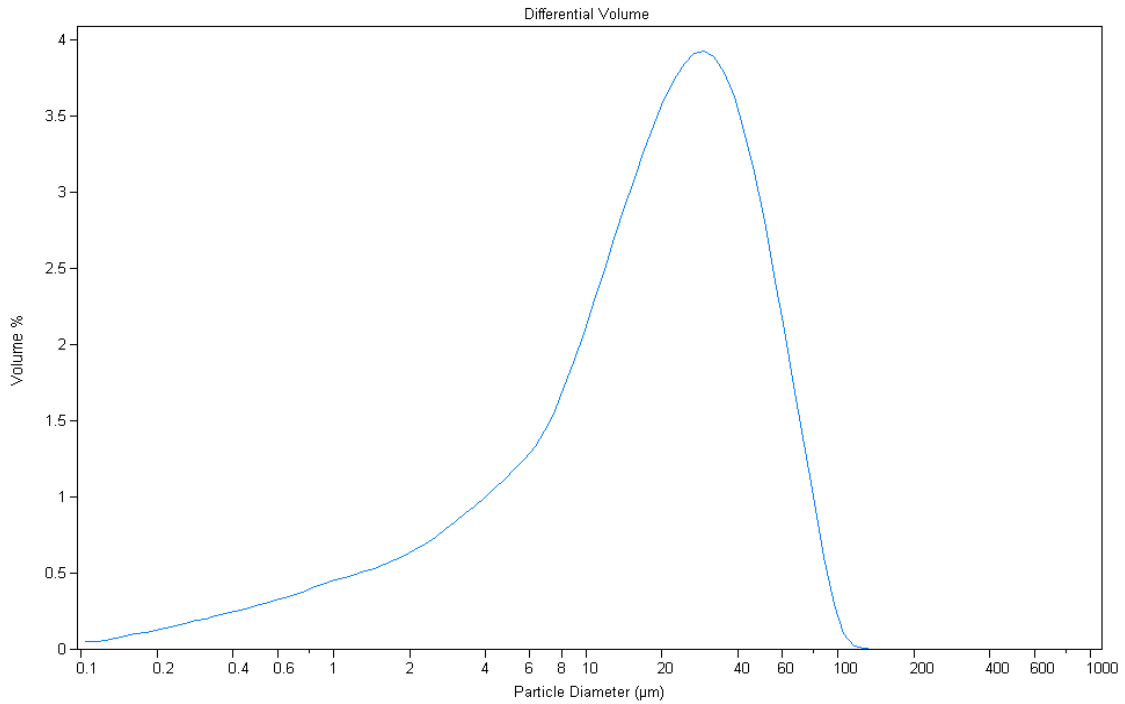


Figura 8. Distribución del tamaño de partícula en el caolín.

En la Tabla 2 se presentan las diferentes ecuaciones reológicas constitutivas para diferentes concentraciones de CMC en agua, a mayor concentración se observa una disminución en el valor de n, lo que indica un comportamiento reológico pseudoplástico (Naranjo, 1999).

Concentración CMC P/P	Ecuación constitutiva
0.25	$\tau = 0.05865 (\dot{\gamma})^{0.8409}$
0.50	$\tau = 0.168726 (\dot{\gamma})^{0.7816}$
0.75	$\tau = 0.3415 (\dot{\gamma})^{0.7143}$
1.00	$\tau = 0.82738 (\dot{\gamma})^{0.5664}$

Tabla 2, ecuaciones constitutivas reológicas para las diferentes concentraciones de CMC

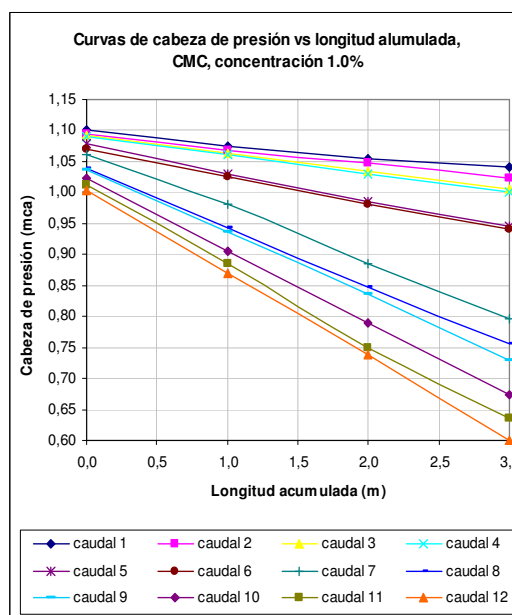
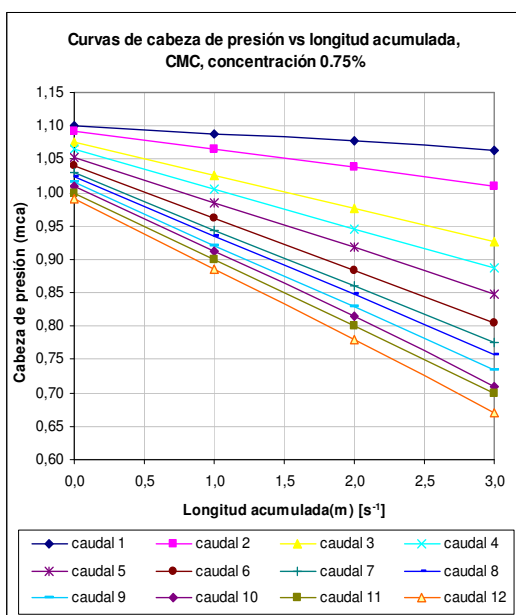
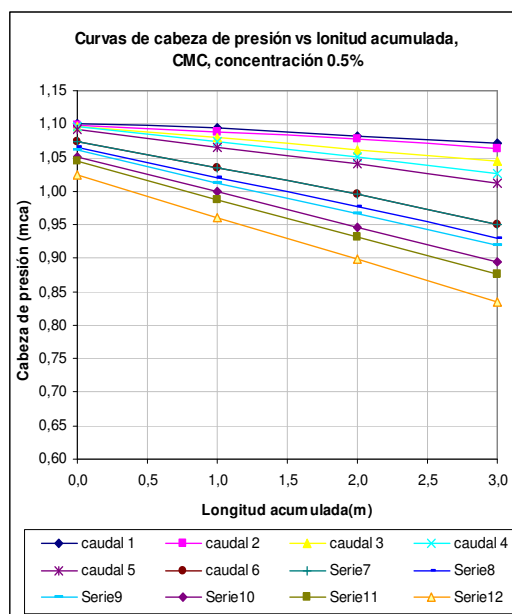
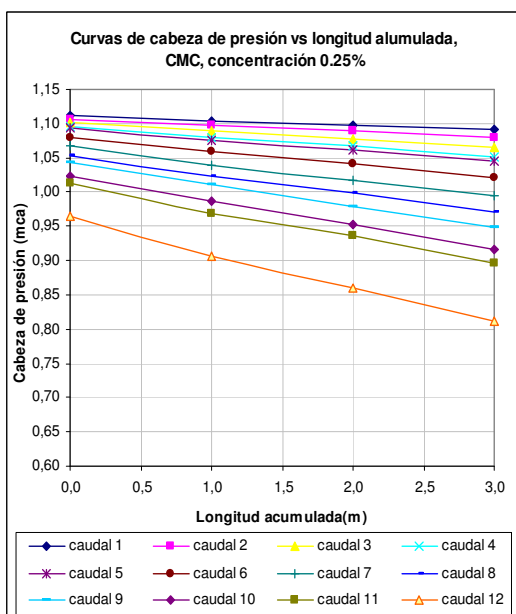


Figura 9. Curvas de $\Delta p/l$ vs longitud

Reogramas CMC: La tendencia de los reogramas (Figura 10) para las diferentes concentraciones que se experimentaron para el CMC según modelo reológico de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed (UPC, 2004). La concentración de 0.25% muestra un reograma tipo Bingham, las concentraciones de 0.50, 0.75 y 1.0 % tienen una tendencia tipo pseudoplástico (Naranjo, 1999).

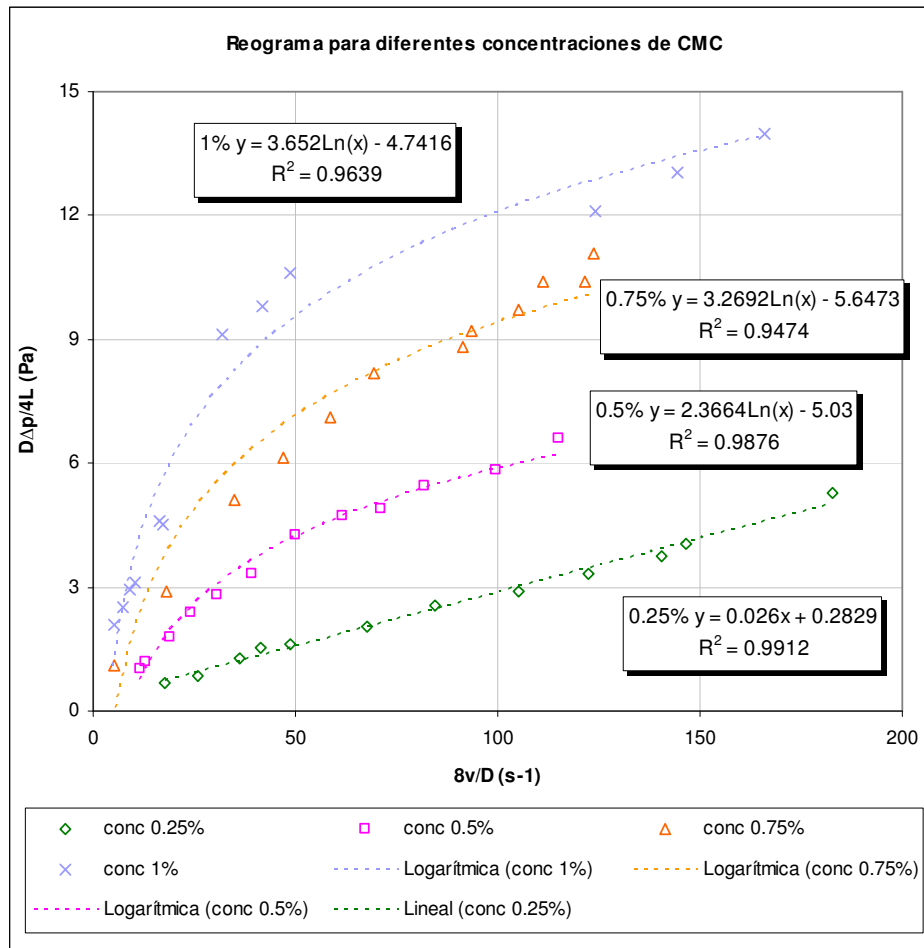


Figura 10. Gráfico de la tendencia de reogramas del CMC.

Caracterización reológica caolín: Los cálculos de los reogramas se realizaron con base al modelo de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed (UPC, 2004). Las curvas de $\Delta P/L$ en función de la longitud acumulada para los diferentes caudales se presentan en la Figura 11 siendo el caudal 1 el mínimo y el caudal 12 el máximo. El incremento en las pendientes se da debido al incremento en las pérdidas longitudinales de energía y éstas debido al incremento del caudal. Este comportamiento lineal se presenta en todos los ensayos ocasionado por las mismas razones. En la Figura 11 se observa el comportamiento lineal que se da entre la cabeza de presión y la longitud, lo que indica que $\Delta P/L$ es constante.

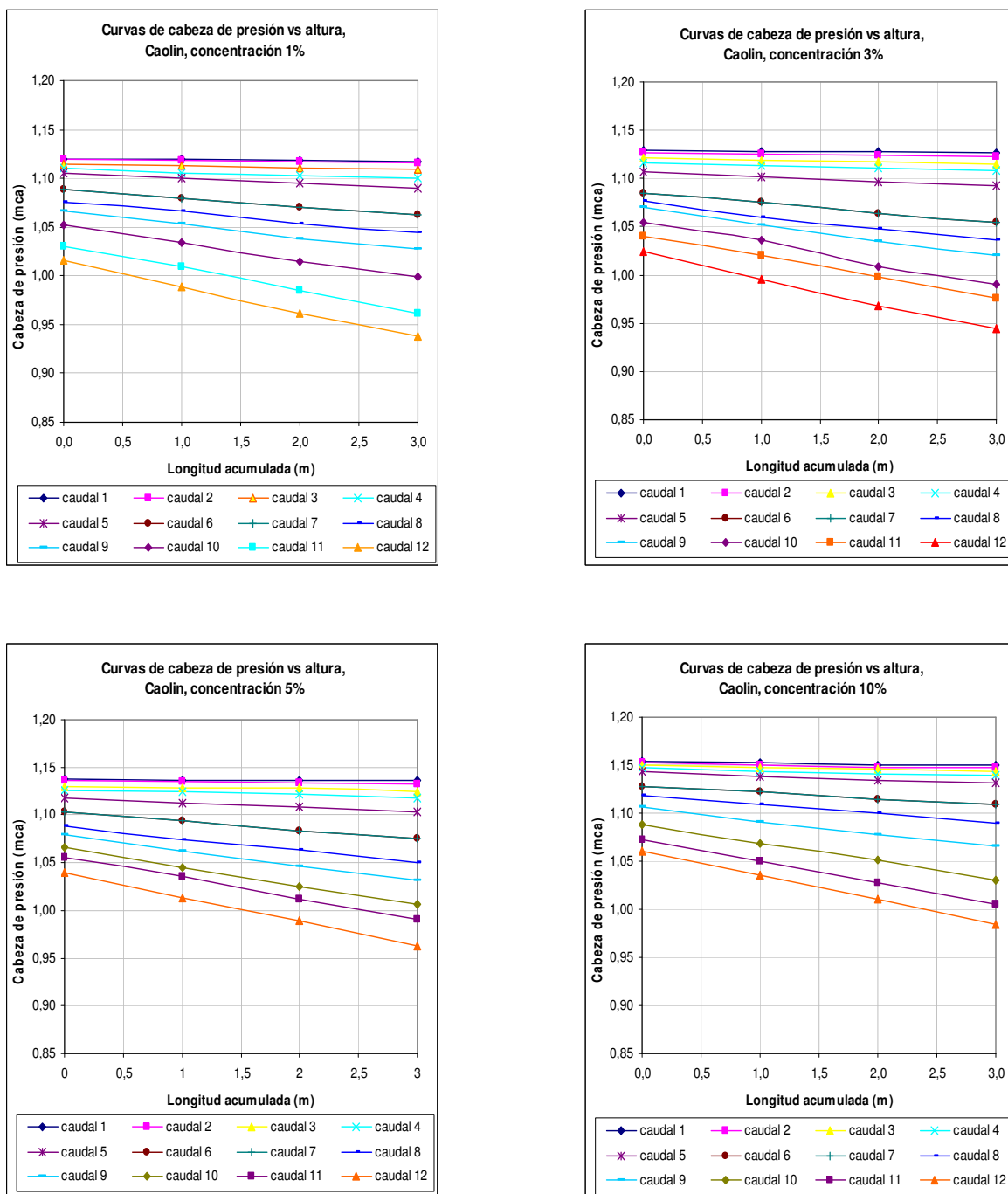


Figura 11. Tendencia de los reogramas en el caolín.

En la Tabla 3 se muestran las diferentes ecuaciones reológicas constitutivas para diferentes concentraciones de caolín en agua, no se ve una tendencia clara de los reogramas en

función de la concentración, es claro que al ser $n > 1$ presenta un comportamiento dilatante (Naranjo, 1999).

Concentración CMC P/P	Ecuación constitutiva
1.0	$\tau = 0.00217 (\dot{\gamma})^{1.362}$
2.0	$\tau = 0.00058 (\dot{\gamma})^{1.6297}$
3.0	$\tau = 0.001489 (\dot{\gamma})^{1.4144}$
5.0	$\tau = 0.00159 (\dot{\gamma})^{1.4242}$
10.0	$\tau = 0.00674 (\dot{\gamma})^{1.1205}$

Tabla 3. Ecuaciones constitutivas reológicas para las diferentes concentraciones caolín

Reogramas caolín: La tendencia de los reogramas (Figura 12) para las diferentes concentraciones que se experimentaron para el caolín según modelo reológico de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed (UPC, 2004). Todas las concentraciones presentan una tendencia reológica tipo dilatante (Naranjo, 1999). Los coeficientes de correlación arrojan resultados mayores al 0.95%, lo que indica un buen ajuste analítico y un buen trabajo experimental.

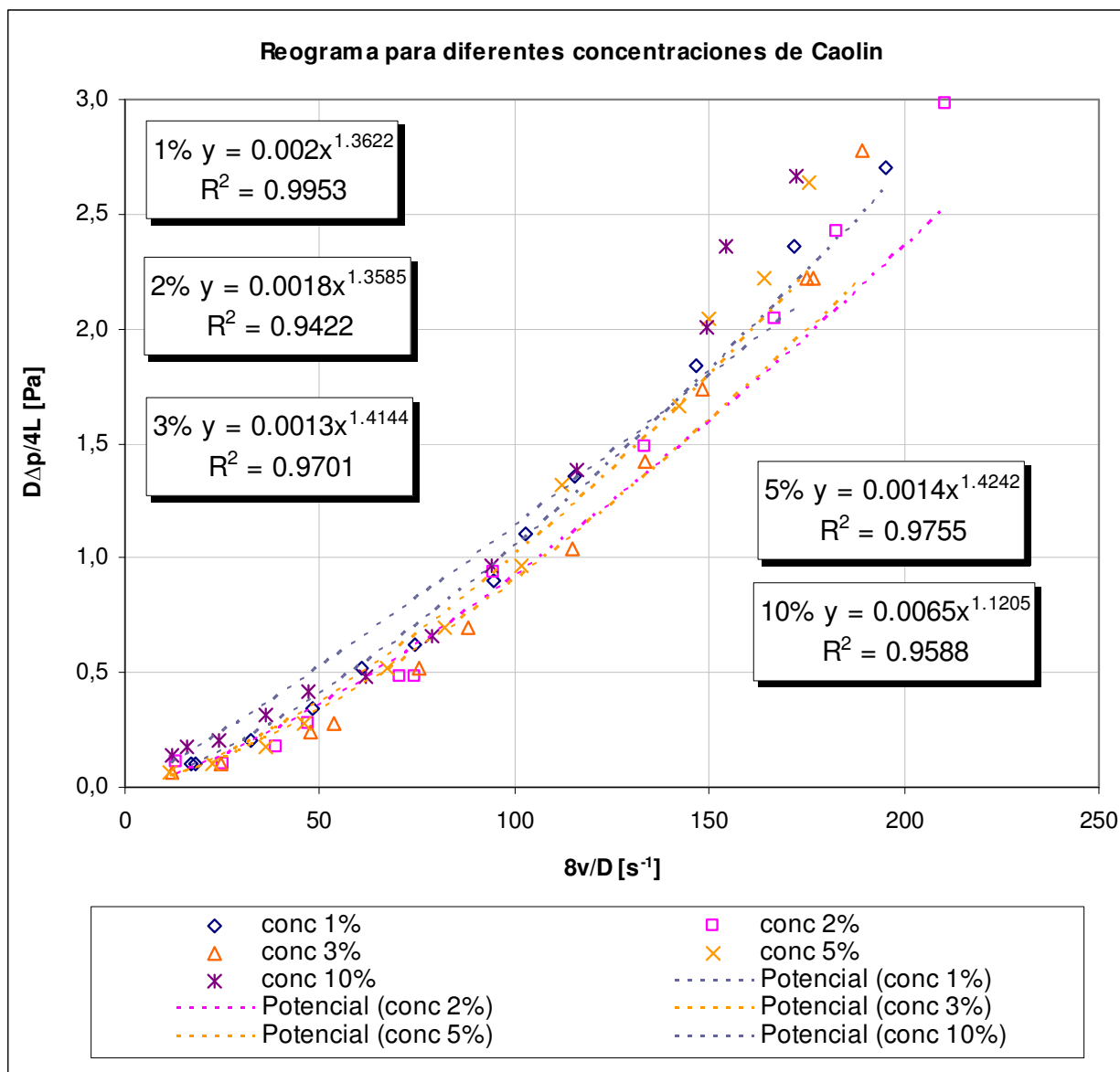


Figura 12. Tendencia de los reogramas en el caolín.

5. Conclusiones

El dispositivo de Reynolds que se implementó en esta investigación permitió realizar un estudio reológico a fluidos no Newtonianos independientes del tiempo. La caracterización realizada mediante SEM, DRX y DTP al CMC y al caolín arrojó resultados similares a los reportados en la literatura.

La caracterización reológica se va ampliamente favorecida utilizando el modelo de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed (ley de potencia generalizado) por la ventaja que presenta de que todas las variables se pueden medir en laboratorio. En las ecuaciones constitutivas halladas para el CMC y caolín el índice de consistencia al flujo para las diferentes concentraciones dio valores mayores que 1 para el carboximetil celulosa, y menores que 1 para el caolín, esto índices indican un comportamiento pseudoplastico para el carboximetil celulosa y dilatante para el caolín.

La agitación que se produce al pasar el fluido por el interior de la bomba sumergible garantiza que no de sedimentación, garantiza condiciones estables en la concentración, permaneciendo estable en el tiempo. Los coeficientes de determinación en los gráficos de $\Delta p/L$ para CMC y Caolín dieron mayores del 95% para todas las concentraciones de trabajo, lo que da una buena confiabilidad en la experimentación realizada. Los resultados obtenidos muestran que el dispositivo desarrollado en esta investigación es una buena alternativa, confiable y económica, para realizar estudios reológicos de fluidos no Newtonianos independientes del tiempo.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al apoyo del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

6. Referencias

- AGUIRRE-PE, J, MONCADA, A.T., GUATARASMA, L., SUÁREZ, A. “Reología y mecánica de barros y lodos”. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 9, no. 2, pp. 39-50. 2005
- ASTARITA, M. “An Introduction to non-newtonian fluid dynamics”, New York : Addison - Wesley. 328 p. 1967
- BLASCO, J. “Métodos de medidas reológicas”. Curso de Reología aplicada. Zaragoza: Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza. 38 p. 2006
- CASTRO, S.L., TORO, C.M. “Diseño de un ducto para el transporte de Colín”. Medellín: [s. n.]. 2 v. Tesis (Ingeniero Civil) Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 1992
- DIRECT INDUSTRY. “Reometro: 23 productos industriales”. [En Línea]. (Consultado 01 de septiembre de 2010). <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/reometro-73702.html>
- HERMELIN B. D., OCHOA, A. “Estudio reológico de un lodo y aplicación”. Medellín: [s.n.]. 163 p. Tesis (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 1998
- LÓPEZ, H. “Reogramas de soluciones coloidales de Metil Celulosa y Carboximetil Celulosa Sódica”. Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas, No. 27, p. 13-16. 2002

- MACOSKO, CH.W. "Rheology: principles, measurements and applications". New York: Wiley-VCH, 568 p. 1994
- MAESTRO, A. "Reología de espesantes celulósicos para pinturas de agua: modelización y mecanismo de espesamiento asociativo". Barcelona: [s.n.]. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. Facultad de Química. 2002
- NARANJO, J. A. "Introducción a la Reología". Medellín: Universidad Nacional de Colombia. 149 p. 1999
- RESTREPO, B. O., & SANCHO, M. J. "Activación mecánica del caolín como vía para la fabricación de azul ultramar". Dyna, vol.71, no. 142, pp. 47-56. 2004
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA – UPC. "Escuela de Ingenieros Industriales de Terrassa. Departamento de Mecánica de Fluidos de la. Reograma de un fluido", Barcelona . [s.n.], 10 p. 2004
- VÁSQUEZ, F, TORRES, L.M. GARZA, L. L, MARTÍNEZ, A. LÓPEZ, W. "Caracterización por XANES", análisis mineralógico y aplicación industrial de un depósito de caolín de México. En: Materiales de Construcción, vol. 59, no.294, p.p. 113-121. 2009