

# Carboxymethyl cellulose (CMS) high and low Viscosity: Flow curve analysis by implementing the Power Law rheology model

Xavier Salas Barzola, Ingeniero<sup>1</sup>, Johanna Zambrano Anchundia, Ingeniera<sup>2</sup>, Alvaro García Villalva, Ingeniero<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Grenoble Alpes, Francia, xavier.salas-barzola@etu.univ-grenoble-alpes.fr

<sup>2</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, jolizamb@espol.edu.ec, alrogarc@espol.edu.ec

*Abstract -- The scope of this study is to implement the Power Law rheology model to characterize the shear stress behavior and flow curves for the Carboxymethyl cellulose (CMC) of high and low viscosity by analyzing experimental data obtained in conventional viscometers. Through computational algorithms, the preliminary data will be processed in order to obtain the relation between shear stress and apparent viscosity versus share rate, those last also named flow curves. In addition, the performance in the increment of the apparent viscosity comparing both products will be studied, focusing in finding where the differences are higher by evaluating different concentrations. Finally, the effectivity of the Power Law model applied to CMC will be discussed and some considerations for future experiments are suggested to achieve an optimum fit in the pseudoplastic characterization of the fluid in study.*

*Keywords-- Rheology, flow curves, viscosity, shear stress, shear rate, drilling mud, pseudoplastic fluid, Power Law, Carboxymethyl cellulose, polymer.*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.265>  
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

# Carboximetilcelulosa (CMC) Alta y Baja Viscosidad: Análisis de curvas de flujo e implementación del Modelo Reológico de Potencia

Xavier Salas Barzola, Ingeniero<sup>1</sup>, Johanna Zambrano Anchundia, Ingeniera<sup>2</sup>, Alvaro García Villalva, Ingeniero<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Grenoble Alpes, Francia, [xavier.salas-barzola@etu.univ-grenoble-alpes.fr](mailto:xavier.salas-barzola@etu.univ-grenoble-alpes.fr)

<sup>2</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, [jolizamb@espol.edu.ec](mailto:jolizamb@espol.edu.ec), [alrogarc@espol.edu.ec](mailto:alrogarc@espol.edu.ec)

**Resumen:** El presente trabajo tiene como objetivo el estudio del modelamiento reológico de la Carboximetilcelulosa (CMC) de alta y baja viscosidad, mediante la implementación del modelo de Ley de Potencia, utilizando datos experimentales obtenidos en viscosímetros convencionales. Por medio del uso de algoritmos computacionales, se procesarán los datos de laboratorio con el objetivo de obtener las curvas de esfuerzo cortante y viscosidad versus tasa de deformación, éstas últimas conocidas técnicamente como curvas de flujo. Posteriormente se analizará el rendimiento de cada aditivo (en incremento de viscosidad), con el fin de identificar dónde se establecen las principales diferencias entre cada producto en función de su concentración. Finalmente se discutirá sobre la efectividad del modelo de potencia para la carboximetilcelulosa y las futuras consideraciones para optimizar el ajuste del comportamiento de la viscosidad en función de la tasa de deformación que se le aplique al fluido presentado en este estudio.

**Palabras clave:** Reología, curvas de flujo, viscosidad, esfuerzo cortante, tasa de deformación, lodo de perforación, fluido pseudo-plástico, ley de potencia, carboximetilcelulosa, polímero.

**Abstract:** The scope of this study is to implement the Power Law rheology model to characterize the shear stress behavior and flow curves for the Carboxymethyl cellulose (CMC) of high and low viscosity by analyzing experimental data obtained in conventional viscometers. Through computational algorithms, the preliminary data will be processed in order to obtain the relation between shear stress and apparent viscosity versus share rate, those last also named flow curves. In addition, the performance in the increment of the apparent viscosity comparing both products will be studied, focusing in finding where the differences are higher by evaluating different concentrations. Finally, the effectivity of the Power Law model applied to CMC will be discussed and some considerations for future experiments are suggested to achieve an optimum fit in the pseudoplastic characterization of the fluid in study.

**Keywords:** Rheology, flow curves, viscosity, shear stress, shear rate, drilling mud, pseudoplastic fluid, Power Law, Carboxymethyl cellulose, polymer.

## I. INTRODUCCIÓN

Pese a la existencia de los actuales métodos sísmicos que permiten estimar la presencia de hidrocarburos, es la perforación de pozos la única herramienta que dispone la industria petrolera para corroborar la existencia de este recurso y que, en caso de existir y presentar factibilidad económica para justificar sus operaciones, permitirá producirlo.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.265>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Tal es la importancia de la perforación de pozos petroleros que es necesario tener el mayor conocimiento de las variables que se encuentran involucradas en este proceso, y una de ellas es la hidráulica de los fluidos de perforación.

Conocer la hidráulica y reología de los fluidos de perforación facilitan la optimización de este proceso, debido a que las propiedades físicas y químicas que en ellas se estudian contribuyen a aspectos importantes como: el control de las presiones para evitar el excesivo filtrado de fluido hacia las formaciones, transmisión de energía a la broca para optimizar la velocidad de penetración, mantener los ripios de perforación en suspensión, extraer los ripios hasta la superficie, entre otros aspectos que garantizan el éxito de la perforación de un pozo petrolero, siendo imprescindible la correcta caracterización del fluido de perforación.

Si el lodo llegase a incumplir alguna de las funciones señaladas anteriormente, se podrían presentar problemas tales como: reventones, pérdida de circulación, adherencia de tubería, erosión y daños en la formación, valores altos de torque que tienden a reducir de manera significativa la eficiencia de la perforación, originando en algunos casos daños a los equipos, herramientas y grandes pérdidas económicas e incluso humanas.

Uno de los inconvenientes más comunes en las operaciones de perforación es la pérdida de circulación. Con la finalidad de evitar que el lodo de perforación migre hacia las formaciones, se incorpora a éste aditivos y materiales tales como lignitos, materiales asfálticos, carbonato de calcio y polímeros que ayudan a mitigar complicaciones de este tipo[1].

En ese sentido, el polímero orgánico denominado carboximetilcelulosa (CMC) es uno de los más conocidos, se considera un reductor de pérdida de agua y proporciona mayor viscosidad a los fluidos de perforación, sobre todo a los lodos de base agua dulce y base agua salada[2].

Para caracterizar el comportamiento del lodo con determinados aditivos, se implementan varios modelos reológicos a través de los cuales se puede realizar un ajuste matemático de la deformación del lodo como reacción a una tasa de corte dada.

Estos modelos han aportado argumentos teóricos, la mayoría de ellos son resultado de información experimental. Las ecuaciones que mejor se ajustan al fluido de estudio dependen de la naturaleza y calidad del material y de los datos de viscosidad disponibles para dicho fluido[3].

El objetivo principal de la presente investigación es establecer la relación que existe entre la concentración de CMC y la resistencia a fluir del fluido, además de determinar el porcentaje de variación de dicha diferencia de viscosidad entre el CMC de alta y el de baja viscosidad.

Esta investigación consta de tres etapas: en la primera fase se realizará el levantamiento de información bibliográfica que servirá de base para sustentar el presente estudio, se definirá el alcance del análisis y el modelo matemático a emplear.

En la fase dos, se definirá las herramientas para la obtención y procesamiento de información, los materiales, equipos y el laboratorio facilitador para la realización de los ensayos experimentales requeridos.

Por último, en la tercera etapa se procesará computacionalmente la información de laboratorio obtenida, con la finalidad de describir la evolución del esfuerzo cortante y la variación de la viscosidad aparente cuando el fluido es sometido a diferentes tasas de deformación, en función del incremento en la concentración de CMC en el lodo de perforación.

Para este estudio se modelará los datos obtenidos a partir de ensayos con el polímero de alta y de baja viscosidad y se realizará la comparación de cuánto varía el comportamiento de las curvas del de alta en referencia al de baja viscosidad. Se analizará, además, la bondad de ajuste del modelo de potencia implementado para este fluido.

## II. METODOLOGÍA

El tipo de investigación que se empleará para analizar este tema es de carácter exploratorio y descriptivo, debido a que se parte de datos experimentales que permitirán modelar un fenómeno físico. La Fig.1, muestra la metodología empleada en este estudio.

### A. Justificación

La importancia de conocer el comportamiento de un fluido cuando es sometido a diferentes velocidades de deformación forma parte fundamental de la hidráulica de perforación. La viscosidad de un fluido no newtoniano varía con respecto a la tasa de corte que se le aplique, en su analogía con las operaciones de perforación podemos indicar que la viscosidad aparente del fluido es diferente cuando no se circula el pozo (bombas no operando), más aún si el fluido tiende a solidificarse a bajas o nulas tasas de cizalla (reposo),

aumentando considerablemente su resistencia a fluir en este régimen elástico de bajas velocidades de corte donde su relación entre ambos parámetros comienza siendo lineal. Por otro lado, conforme se incrementa la velocidad de deformación (bombas del taladro empiezan a circular el pozo), el fluido pasa por un régimen viscoso para luego mostrar un comportamiento plástico, su viscosidad muestra una relación no lineal con el incremento de velocidad de circulación y es aquí donde, en función de la concentración del viscosificante y temperatura, se vuelve fundamental conocer mediante modelamiento reológico cuál es el comportamiento esperado por parte del fluido de perforación.

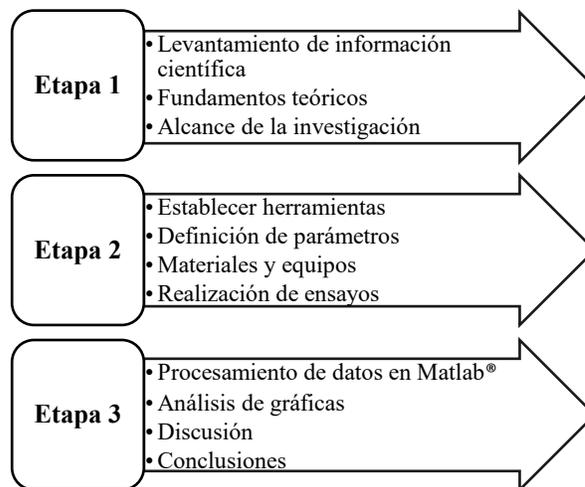


Fig. 1. Metodología de la investigación.

La implementación de varias concentraciones de CMC en el presente artículo se debe a que éste aditivo, que obedece a la Ley de Potencia para describir su cambio de viscosidad a varias tasas de deformación[4], tiene un profundo impacto en la reología del lodo para evitar la filtración de fluido por las paredes porosas y permeables del pozo en perforación, y se hace necesario analizar su rendimiento en el incremento de viscosidad por tipo de aditivo, es decir, cómo y cuánto cambia discerniendo la naturaleza del producto (baja y alta viscosidad).

No obstante, se modelará los datos experimentales bajo la Ley de Potencia, y una vez comprobada la tendencia de las curvas de flujo, se analizará las variaciones de viscosidad tanto en el régimen lineal de deformación como en el régimen exponencial, conociendo por estudios previos que los polímeros son caracterizados como fluidos pseudo-plásticos[5].

### B. Marco conceptual

La caracterización de la reología depende básicamente del tipo de fluido en cuestión, en este sentido, para un fluido newtoniano, a determinada presión y temperatura, es necesario conocer únicamente el valor de la viscosidad y por lo tanto un solo dato es suficiente, puesto que sin importar a cuánto esfuerzo cortante esté sometido este fluido, su valor de

resistencia a fluir será constante. Sin embargo, cuando se manejan fluidos no newtonianos el panorama cambia, ya que se hace necesario obtener curvas de flujo donde existe una dependencia entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte[2].

El comportamiento de los fluidos puede definirse como newtonianos o no newtonianos, y esto va a depender de la tensión cortante a la que se encuentre expuesto. En la Fig.2 se ilustra el comportamiento esperado de cada tipo de fluido. Los no newtonianos son los que más usos industriales poseen, tales como aplicaciones hidrocarburíferas, metalúrgicas, alimentarias o químicas[6] [7].

Los modelos que se usan para polímeros se caracterizan por alterar factores importantes como la viscosidad, peso molecular, la concentración polimérica y los cambios en las cadenas que los conforman[8].

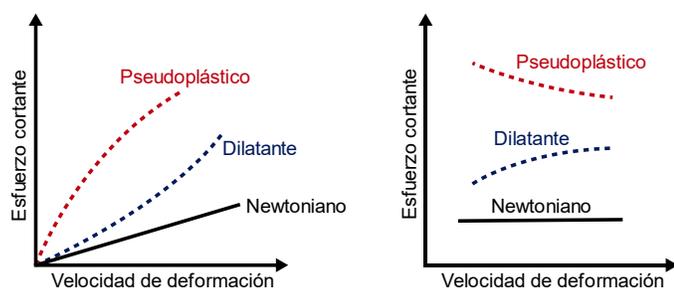


Fig. 2. Comportamiento de esfuerzo cortante y viscosidad versus velocidad de deformación para diferentes tipos de fluidos [9].

El lodo de perforación empleado para este análisis es un fluido no newtoniano, es decir, que la viscosidad del mismo varía en función del gradiente de velocidad, además de las condiciones del fluido como su concentración y temperatura[5].

El fluido de perforación generalmente está compuesto de una fase sólida y una fase líquida, que al ser sometido a un proceso de agitación forma una fase homogénea que permite cumplir las funciones antes mencionadas[10]. La parte sólida del fluido de estudio es bentonita, la cual es un mineral arcilloso empleado ampliamente en los lodos de perforación, su función principal es el control de la filtración y viscosidad[11].

En la fase de diseño del lodo de perforación generalmente se requiere de la implementación de otros aditivos que permitan alcanzar los valores de ciertos parámetros, para este proceso se utilizan polímeros.

El uso de los polímeros en la elaboración de los fluidos de perforación posee una historia significativa, debido a que en sus inicios utilizaban almidón de maíz para controlar el filtrado. Hoy en día el desarrollo de este aditivo ha sido sustancial para las operaciones de perforación, y más cuando se perfora con lodos base agua[12].

Los polímeros son compuestos orgánicos que ayudan a aumentar la viscosidad y por ende a reducir las pérdidas por filtrado en zonas productoras, incluso cuando se utilizan en pequeñas concentraciones. Se caracterizan debido a su bajo contenido de sólidos, y por su función de inhibición en arcillas expansibles y lutitas no consolidadas[13].

Para nuestro estudio, el cual hace referencia al uso del CMC, éste se caracteriza por ser un polímero natural modificado, a través de la celulosa y el almidón. De manera general, la alteración en los polielectrolitos, hacen que el polímero sea soluble en agua[12].

Es uno de los aditivos más comunes, utilizado principalmente para evitar problemas de pérdida de fluido en las formaciones. Se fabrica mediante la reacción de la celulosa natural con ácido monocloroacético e hidróxido de sodio [NaOH] para formar la sal sódica de CMC[14].

El CMC es un agente aglutinante y viscosificante inerte, además la viscosidad y la solubilidad de la misma son dependientes del pH de dicho polímero[15]. Este polímero se disuelve en agua para formar una solución pseudo-plástica y tixotrópica, mientras que la viscosidad decrece conforme aumenta la temperatura.

La principal función del CMC en el fluido de perforación es formar un revoque fino en las paredes de la formación de tal manera que se impida el filtrado de agua.

### C. Herramientas Utilizadas

Para modelar el comportamiento de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para un fluido (pseudo-plástico en nuestro caso de estudio), es necesario la utilización de un reómetro o viscosímetro, instrumento ampliamente utilizado en la industria petrolera tanto en laboratorios como en taladros de perforación.

Considerando el alcance del presente análisis en lodos de perforación de base agua, los equipos y herramientas utilizadas en los experimentos y las especificaciones de cada uno de ellos se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1  
EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS

Equipo	Descripción
Viscosímetro	Marca Fann Modelo 35A
Mezclador	Multimixer para grandes volúmenes
CMC	Alta Viscosidad – Comercial
CMC	Baja Viscosidad – Comercial
Bentonita	Densificante – Comercial
Agua	Base del lodo de perforación

#### D. Consideraciones Generales

La repetición de los ensayos de laboratorio dependen sustancialmente de las condiciones (ambientales y técnicas) en las cuales se realicen, para tal efecto consideramos pertinente que, para futuros análisis, se tomen en cuenta las siguientes consideraciones para así asegurar que los datos experimentales sean muy próximos o cuya diferencia no sea significativa, además de que, todos estos procedimientos se realizaron según lo indica la norma API RP 13B-1/ISO 10414-1[16].

Los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente 80°F. El agua utilizada fue tomada directamente del sistema de potabilización público, teniendo una densidad API alrededor de 10. Los aditivos utilizados fueron tamizados para evitar la contaminación del lodo por sólidos no deseados.

Se dejó mezclar el lodo de perforación en el multimixer por 30 minutos para obtener una mezcla homogénea con los aditivos. Para la toma de datos se utilizó 4 viscosímetros Fann 35A, tomando dos lecturas experimentales por velocidad de deformación (3, 6, 100, 200, 300, 600 RPM), obteniendo como población de muestreo 6 lecturas por velocidad por 6 diferentes concentraciones de CMC (5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30%), esto es un total de 144 lecturas procesadas estadísticamente para el modelamiento de Ley de Potencia.

Los viscosímetros Fann 35A están equipados de una configuración de rotor y bob estándar R1-B1 y resorte de torsión F1, por lo que se implementan en los cálculos las variables  $k=300$  y  $f=1$ , propias del equipo [17]. Se utiliza, además, el factor de corrección de 1.066 para transformar unidades de mPa.s a lb/100ft<sup>2</sup>, en la Fig.3 de ilustran las partes básicas del equipo utilizado.

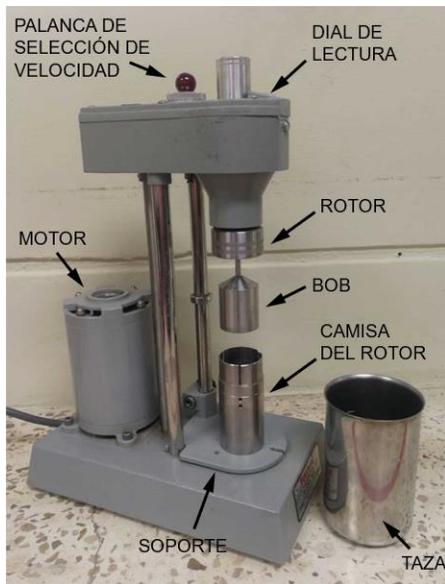


Fig. 3. Viscosímetro Fann Modelo 35<sup>a</sup>, partes y piezas.

Se implementó un algoritmo en Matlab® para el procesamiento y modelamiento de los datos experimentales, con el objetivo de obtener el menor error posible en los cálculos reológicos y analizar la bondad de ajuste con las observaciones de los ensayos.

#### E. Descripción del Ensayo

La base del lodo de perforación objeto de estudio es el agua, densificada con bentonita (al 17,5 g) y teniendo como aditivo de pérdida de filtrado la Carboximetilcelulosa de baja y alta viscosidad, comercializadas en la industria petrolera para tal fin.

En total, se elaboró como base 9 litros de lodo de perforación (agua + bentonita), al que se le fue añadiendo CMC de alta y baja viscosidad en función de diferentes concentraciones porcentuales como se indica en la Tabla 2.

TABLA 2  
GRAMOS DE CMC SEGÚN LA CONCENTRACIÓN

Porcentaje (%)	Cantidad (g)
5	1
10	2
15	3
20	4
25	5
30	6

La finalidad de emplear cuatro viscosímetros para realizar la toma de datos del mismo experimento fue obtener el menor margen de error en las mediciones, al final se obtuvo la media aritmética de dichos valores de lectura y fue con esos datos promedios que se procedió a determinar los parámetros para obtener las gráficas.

Previo a la ejecución de los ensayos se verificó el correcto funcionamiento de los equipos a utilizar. Para esto se empleó agua, un fluido newtoniano, es decir que a pesar de que se varió la velocidad de deformación, los cálculos de viscosidad procesados con las lecturas del dial daban un valor casi constante.

En las Tablas 3 y 4 se muestran los valores promedios obtenidos mediante los ensayos experimentales:

TABLA 3  
VALORES PROMEDIO DE EXPERIMENTACIÓN  
CMC BAJA VISCOSIDAD

RPM	5%	10%	15%	20%	25%	30%
<b>3</b>	1.25	1.38	1.75	1.88	1.88	2.00
<b>6</b>	1.88	1.75	2.13	2.13	2.25	2.38
<b>100</b>	3.25	3.13	3.75	4.63	5.63	6.13
<b>200</b>	4.63	5.00	6.63	7.88	8.50	10.50
<b>300</b>	5.63	7.75	9.63	11.25	12.75	14.88
<b>600</b>	10.13	13.50	16.63	21.00	23.75	30.00

TABLA 4  
VALORES PROMEDIO DE EXPERIMENTACIÓN  
CMC ALTA VISCOSIDAD

RPM	5%	10%	15%	20%	25%	30%
3	1.50	1.63	1.75	2.25	2.38	2.625
6	2.00	2.25	2.38	2.25	2.63	2.63
100	3.25	4.88	6.13	8.25	11.00	14.38
200	5.50	8.00	11.13	14.63	19.50	25.75
300	7.50	11.25	15.75	21.25	28.50	37.88
600	13.50	21.00	28.50	39.00	51.88	68.88

#### F. Modelo Reológico

La viscosidad de un fluido a una tasa de corte se define como:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1)$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo cortante a una tasa de corte determinada.

Para fluidos newtonianos,  $\mu$  es constante pero en fluidos no newtonianos, ésta varía en función de la velocidad de corte  $\gamma$ , es por esta razón que cuando se citan los resultados, se debe proporcionar tanto el valor de viscosidad como la velocidad de corte a la que se midió[18].

El modelo reológico Ley de Potencia (Power Law) se define como:

$$\tau = K\gamma^n \quad (2)$$

Donde K es el coeficiente de consistencia de flujo y n es índice de comportamiento de flujo. Reemplazando  $\tau$  de la ec.2 en la ec.1 se obtiene:

$$\mu = K\gamma^{n-1} \quad (3)$$

Los parámetros que intervienen en este modelo reológico se calculan a partir de las lecturas directas de la experimentación con el viscosímetro, en la Tabla 5 se muestran las ecuaciones que se emplearán para la obtención de las curvas de flujo:

TABLA 5  
ECUACIONES UTILIZADAS

Parámetro	Simb	Unidad	Ecuación
Viscosidad plástica	$\mu_p$	mPa.s	$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300}$
Viscosidad Aparente (Fann)	$\mu$	mPa.s	$\mu = k * f * \frac{\theta}{\omega}$
Esfuerzo cortante	$\gamma_p$	Lb/100ft <sup>2</sup>	$\gamma_p = \theta_{600} - \mu_p$
Índice de comportamiento	n	Adimensional	$n = 3.32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}$
Coficiente de consistencia de flujo	K	Pa.s <sup>n</sup>	$K = \frac{\tau}{\gamma^n} = \frac{\theta_{600}}{1022^n}$

A continuación, se muestran dos ejemplos en los cuales se emplea la Ley de Potencia.

El primero describe materiales pseudo-plásticos, los cuales dominan el campo de la reología. La mayoría de los materiales

son adelgazantes por cizallamiento porque la energía de cizallamiento de entrada tiende a alinear las moléculas o partículas anisotrópicas y desagregar cualquier grupo grande de partículas, reduciendo así la resistencia hidrodinámica general, que a su vez reduce la disipación de energía en el fluido y la viscosidad.

Por otro lado, algunos materiales muestran un aumento de la viscosidad a medida que aumenta la velocidad de corte o la tensión. Este es relativamente inusual, y ocurre en dispersiones de partículas donde la fracción de volumen es relativamente alta.

El engrosamiento por cizalla a veces incluso puede resultar en una expansión volumétrica a medida que los sólidos dispersos se unen, expulsando la fase de suspensión.

La Ley de Potencia puede modelar ambas situaciones simplemente teniendo un índice de comportamiento de flujo menor que uno ( $n < 1$ ) para fluidos pseudo-plásticos o mayor que uno ( $n > 1$ ) para fluidos dilatantes.

### III. RESULTADOS

Luego de adquirir los datos para computarizar las curvas esfuerzo cortante versus tasa de corte y viscosidad aparente versus velocidad de deformación, mediante el desarrollo de algoritmos en Matlab® y aplicando las ecuaciones descritas en la Tabla 5 y la definición matemática de la Ley de Potencia, se obtuvo los valores para describir el comportamiento exponencial de ambos parámetros, citando como ejemplo los resultados para el CMC 5% de baja y alta viscosidad en la Tabla 6.

TABLA 6  
RESULTADOS DE CÁLCULOS REOLÓGICOS

CMC 5%	Baja Viscosidad		Alta Viscosidad	
	TASA DE DEFORMACIÓN [1/s]	ESFUERZO CORTANTE [lb/100ft <sup>2</sup> ]	VISCOSIDAD [mPa.s]	ESFUERZO CORTANTE [lb/100ft <sup>2</sup> ]
5.1069	0.64	125	0.77	150.00
10.2138	0.96	93.75	1.02	100.00
170.2300	1.66	9.75	1.66	9.75
340.4600	2.36	6.94	2.81	8.25
510.6900	2.87	5.63	3.83	7.50
1,021.3800	5.17	5.06	6.89	6.75

En la Fig. 4 se puede observar que la viscosidad del fluido aumenta de manera no lineal conforme se eleva la tasa de corte, dato observado a simple vista durante el desarrollo de la experimentación. Por otra parte, se pudo evidenciar cómo aumenta la viscosidad del lodo ante el aumento de la concentración porcentual de CMC de baja viscosidad.

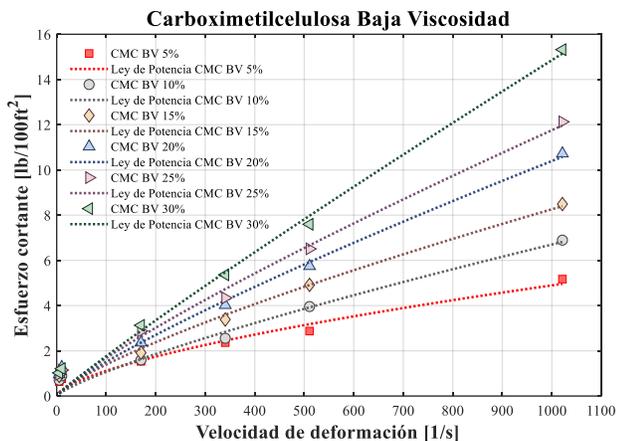


Fig. 4. Curvas del comportamiento de esfuerzo cortante vs tasa de deformación para la Carboximetilcelulosa baja viscosidad.

El mismo comportamiento se observó con el CMC de alta viscosidad, con la diferencia de que, como se muestra en la Fig.5, el incremento no lineal del esfuerzo de cizalla dio valores más altos con respecto al incremento de la concentración de CMC en cada velocidad de deformación, llegando a un máximo de shear stress de 35 lb/100ft<sup>2</sup> para el 30% de alta viscosidad, en comparación con su concentración análoga en baja viscosidad (15.4 lb/100ft<sup>2</sup>).

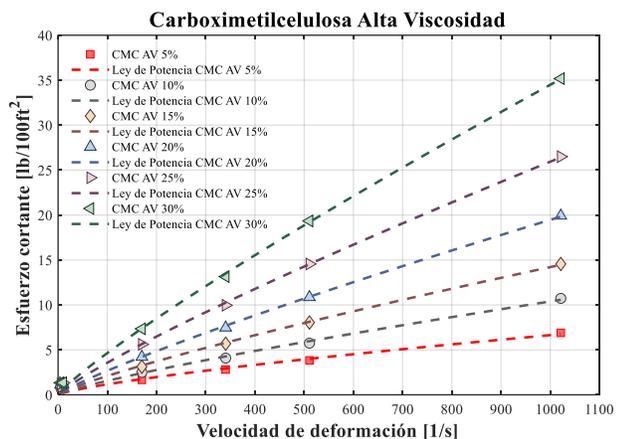


Fig. 5. Curvas del comportamiento de esfuerzo cortante vs tasa de deformación para la carboximetilcelulosa alta viscosidad.

En las Fig.6 y Fig.7 se muestra el comportamiento de la viscosidad aparente versus tasa de corte, en formato log-log, es por esto por lo que se obtiene una recta por cada concentración porcentual.

La viscosidad aparente es mayor a bajas tasas de corte debido a que el fluido tiende a resistirse más a fluir, mientras que a medida que se aumenta la velocidad de rotación la viscosidad aparente tiende a disminuir.

Para el fluido con CMC de baja viscosidad (Fig. 6), se observa que conforme aumenta la concentración del polímero la recta se

superpone a la recta de la concentración inferior, casi de forma paralela, con valores de pendientes similares.

Pese a que la diferencia es observable, la variación de viscosidad difiere en el fluido con CMC de alta viscosidad (Fig. 7), donde a bajas tasas de deformación los valores de viscosidad son más cercanos para todas las concentraciones estudiadas, para luego dispersar y marcar una notoria diferencia a altas velocidades de cizalla.

En la Fig. 8. se realizó una comparación de las curvas de viscosidad para el CMC de alta y baja viscosidad, para lo cual se consideró las concentraciones de 5%, 15% y 30%, únicamente para mejor apreciación de las curvas.

En esta gráfica se observa como varía la viscosidad del fluido con CMC de alta y baja viscosidad a la misma concentración. Al igual que en las Fig.6 y Fig.7 las curvas son decrecientes, pero en este caso no son rectas debido a que se grafican en formato semi-log.

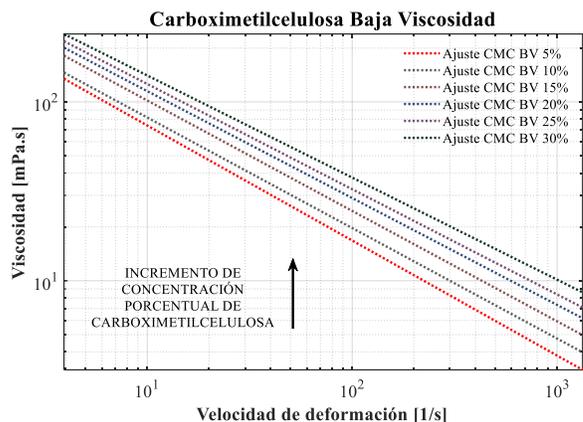


Fig. 6. Ajuste exponencial del comportamiento de viscosidad vs tasa de deformación para la carboximetilcelulosa baja viscosidad.

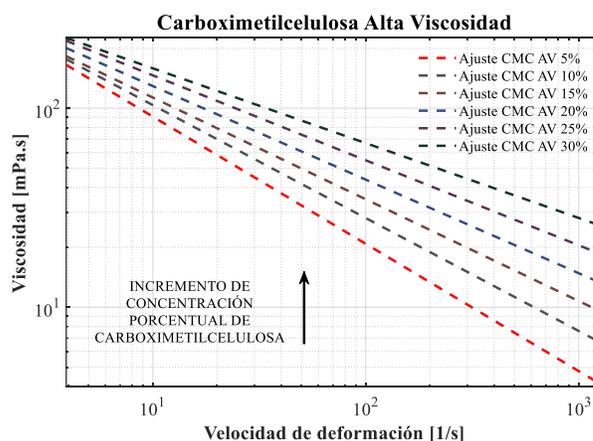


Fig. 7. Ajuste exponencial del comportamiento de viscosidad vs tasa de deformación para la carboximetilcelulosa alta viscosidad.

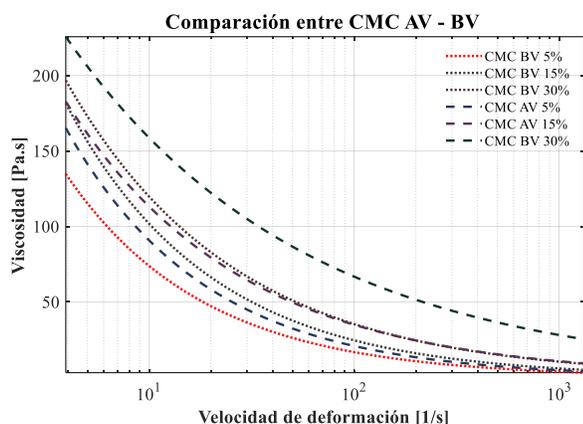


Fig. 8. Comparación entre curvas de flujo para el CMC alta y baja viscosidad.

Es apreciable que, a altas tasas de deformación, la máxima concentración de CMC para baja viscosidad (30%) se ajusta a los valores experimentales de los de alta a 15%. El CMC a 30% para alta viscosidad toma valores mucho más alejados a las demás concentraciones de la gráfica.

Por último, se estableció una gráfica de la diferencia porcentual de los valores de viscosidad entre el fluido con polímero de alta y baja viscosidad (Fig. 9.).

A bajas velocidades de corte no se observa un patrón de comportamiento claro, pero conforme se aumenta la velocidad de rotación del equipo, alrededor de los 100 RPM las gráficas tienden a preservar su diferencia de viscosidad incluso llegando a los 600 RPM.

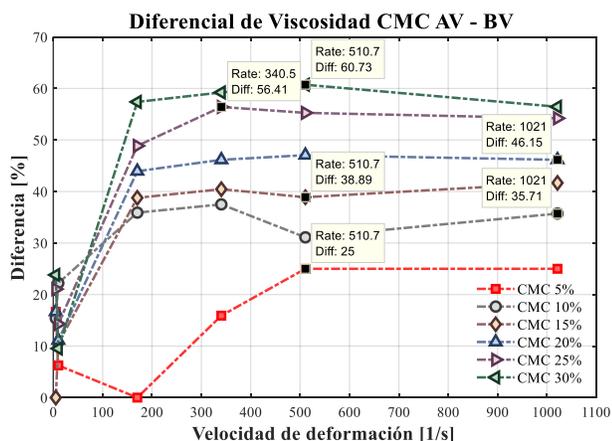


Fig. 9. Diferencia porcentual de valores de viscosidad entre CMC alta viscosidad y baja viscosidad.

#### IV. DISCUSIÓN

En función de los resultados presentados en la sección anterior, el modelo ajustado de Ley de Potencia caracteriza, con cierta efectividad, la evolución de la viscosidad de la carboximetilcelulosa a diferentes tasas de deformación, sin

embargo, es notorio que el ajuste no es el óptimo a bajas velocidades, una de las deficiencias ampliamente estudiadas para este modelo reológico[19].

Con respecto a los datos experimentales, se observó que los valores de dial a bajas RPM son muy similares en ambos productos, pero la relación exponencial es mucho más pronunciada en el CMC de alta viscosidad donde las diferencias de resistencia al flujo son mayores cuando el fluido es sometido a altas RPM.

Dicho esto, se establece una limitante más, que es el equipo utilizado en la caracterización del fluido, ya que al ser lecturas analógicas depende mucho de la apreciación del experimentalista, más aún a bajas revoluciones donde el valor del dial no puede ser sostenido por el equipo como respuesta al rompimiento inicial de los geles del fluido analizado.

Para corroborar lo anterior expuesto, determinamos la desviación estándar de las lecturas de los diales, resumidos en la Tabla 7:

TABLA 7  
DATOS DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL EXPERIMENTO

Desviación estándar	CMC Baja Viscosidad	CMC Alta Viscosidad
Mínimo	0	0
Máximo	0.85	2.95
Media	0.38	0.68

Se puede apreciar que la máxima desviación estándar se da en las lecturas experimentales de CMC alta viscosidad, donde al revisar los datos, se determina que esta desviación converge de mediciones realizadas a 600 RPM, sin embargo, su desviación estándar se reduce a 0.68 unidades como media. He aquí la importancia de tener una población de muestreo considerable para poder promediar valores que, como se mencionó previamente, no son tan precisos debido a la naturaleza del equipo.

Adicionalmente, la implementación de nuevos modelos reológicos: Cross, Carreau-Yasuda, Quemada, Casson, por citar algunos, permiten describir de mejor manera la evolución de la viscosidad aparente en fluidos pseudo-plásticos. La Fig. 10 presenta una comparación ilustrativa de lo anterior señalado.

No obstante, el modelo de Ley de Potencia se ajusta de mejor manera a revoluciones mayores a 100 RPM para ambos productos, y se observa un evidente mejor ajuste en el modelamiento del CMC de alta viscosidad.

La Fig. 11 muestra los límites de incertidumbre en el modelado de CMC 5% alta viscosidad, donde la curva azul es el ajuste exponencial y se detallan los valores de frontera con una exactitud de 90% (curvas discontinuas en rojo), éstos últimos

en función del rango de valores que puedan tomar el índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) y su índice de consistencia ( $K$ ).

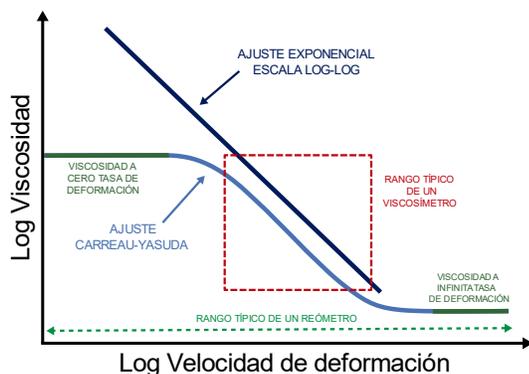


Fig. 10. Comparación de rangos experimentales típicos entre reómetros y viscosímetros.

TABLA 8  
VALORES TEORÍCOS Y EXPERIMENTALES

CMC 5% AV	Índice de comportamiento de flujo, $n$ [adim]	Índice de consistencia de flujo, $K$ [Pa.s <sup><math>n</math></sup> ]
Teórico	0.847	0.0303
Ajuste	0.8173	0.02393

TABLA 9  
BONDAD DE AJUSTE

Bondad de ajuste	Valor
SSE:	0.4595
R-square:	0.9826
Adjusted R-square:	0.9783
RMSE:	0.3389

Como se observa, el valor SSE (Suma de cuadrados del error) que representa la variación atribuida al error, es de 0.4595, mientras que el Coeficiente de determinación (R-squared y Adjusted R-square) da un valor muy cercano a 1 (0.9826 y 0.9786 respectivamente). Finalmente, el error RMSE, que evalúa la desviación estándar de los residuales (errores de predicción) es de 0.3389.

Sobre los resultados de diferencial de viscosidad entre ambos productos, la Fig. 9 indica una función creciente que luego se estabiliza a altas tasas de deformación. Esto confirma que los valores de viscosidad a bajas RPM no son muy distantes, lo que representa una relación Newtoniana inicial con pendiente similar para ambos fluidos.

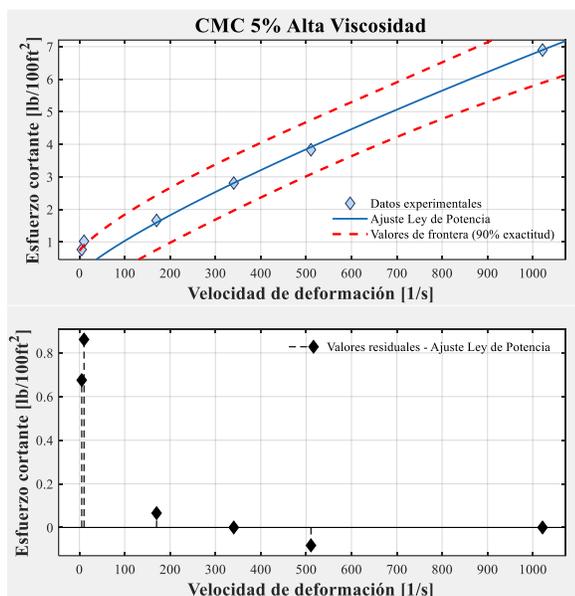


Fig. 11. Estimación de error en el modelamiento de CMC 5% Alta Viscosidad implementando el modelo reológico de Potencia.

En la Fig. 11 además, observamos que la mayor diferencia residual entre el valor de ajuste exponencial y el valor experimental es de 0.8615 unidades, seguido por 0.6753 unidades, ambos residuales a bajas velocidades de deformación, tal como se esperaba.

A pesar de no ser un buen ajuste, los valores de  $n$  y  $k$  guardan proximidad con los valores teóricos, tal como se muestra en la Tabla 8.

A continuación, en la Tabla 9 se presenta los valores del modelo estadístico para determinar la bondad de ajuste que resume la discrepancia entre los valores observados y los computarizados con el ajuste de Ley de Potencia.

Además, observamos que la diferencia en el rendimiento de viscosidad toma un comportamiento definido a más de 100 RPM, tratando de mantener la diferencia entre sus valores de resistencia a fluir hasta el límite de velocidad (600 RPM), a excepción de la diferencia porcentual de CMC a 5% en la que no se puede observar una tendencia lineal con sólo dos puntos (viscosidades a 300 y 600 RPM), lo que haría necesario el estudio de concentraciones intermedias entre 5%-10% e inferiores a 5%.

Con los resultados discutidos, la razón de cambio en el diferencial de viscosidad podría estar asociado con el valor de  $C^*$ , concentración crítica en la cual la viscosidad tiende a valores muchos más elevados cuando la concentración aumenta (mayor valor de pendiente en comparación con menores concentraciones a  $C^*$ ), como resultado del aumento del peso por mol de polímero, pero se hace necesario un análisis experimental concreto para obtener conclusiones más claras.

Sobre la Ley de Potencia, este modelo presenta limitantes como el hecho de que la viscosidad tiende a infinito para tasas de deformación bajas y cuando la viscosidad disminuye de forma continua para altas tasas de deformación[20], además la viscosidad aparente podría presentar valores singulares, es decir, sin cotas inferiores o superiores[21], lo que por lo general converge en la primera deficiencia mencionada.

Considerando la limitante anterior, otros modelos reológicos pueden ser implementados para modelar, con más eficiencia, el fluido en estudio. Citamos como ejemplo el modelo de Ley de Carreau–Yasuda, que no posee tal inconveniente en comparación con la Ley de Potencia. Carreau–Yasuda se caracteriza por ser empírico y adaptable, el cual detalla de la mejor forma la viscosidad por esfuerzos de corte de polímeros homogéneos[22]. Esto ayuda a controlar el rango de viscosidades, acotando valores límites en la viscosidad cuando el modelo de ley de potencia posee alteraciones, dispersándose del valor esperado para altas y bajas tensiones cortantes[21].

La Fig. 12 muestra una extrapolación de valores a casi nulas RPM para visualizar una comparación ilustrativa con el modelo de potencia.

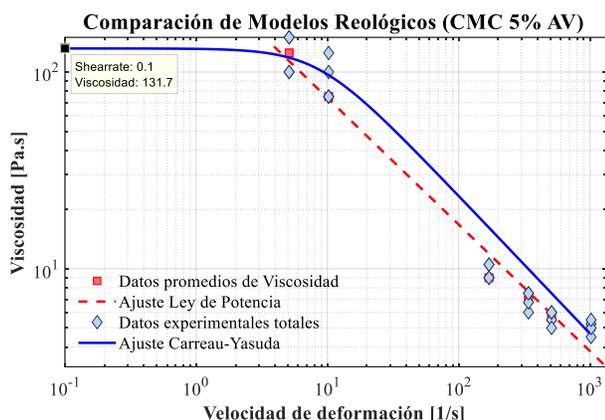


Fig. 12. Comparación entre los modelos reológicos de Potencia y Carreau-Yasuda, una aproximación del valor de viscosidad a tasa de deformación casi despreciable (reposo).

La relación de variables implementando la Ley de Potencia es una pendiente constante correspondiente a los índices  $K$  y  $n$  del modelo en una escala log-log; por otro lado, la curva de Carreau-Yasuda posee tendencias constantes lineales para bajas y altas tasas de corte (no mostrada en Fig. 12 por falta de datos a altas tasas de deformación), y evidentemente es variable en su sección intermedia.

Como se ilustra, ambos modelos tienen pendientes similares en el decaimiento exponencial, pero se hace estrictamente necesario la utilización de un reómetro para implementar el modelo de Carreau-Yasuda y determinar de forma eficiente las viscosidades limitantes en los extremos.

## V. CONCLUSIONES

En el presente artículo, se ha contrastado el comportamiento de un fluido de perforación con aditivo CMC de alta y baja viscosidad, a través del modelamiento reológico implementado por la Ley de Potencia, el cual se caracteriza según los resultados obtenidos, por buena precisión a velocidades altas, más no a velocidades bajas; este último, se manifiesta debido a

que el modelo proporciona un esfuerzo cortante cercano a cero cuando la velocidad de corte es igual a cero.

El uso de varios viscosímetros de Fann ayudó a obtener resultados menos dispersos. Al computarizar los distintos componentes pertenecientes al modelo, el promediar todos los datos experimentales obtenidos ayudó a disminuir la desviación de los valores, originados por errores del equipo analógico o por la apreciación del analista.

Analizando diferentes concentraciones de CMC, se obtuvo como resultado que el esfuerzo de corte se ajusta a una relación exponencial con respecto a la velocidad de deformación del fluido, caracterizado por un fluido pseudo-plástico, esto es un Índice de comportamiento de flujo,  $n$ , menor a 1. Las curvas de flujo indican que las variaciones de resistencia a fluir para el CMC de baja viscosidad a una velocidad de deformación determinada, para las diferentes concentraciones tienden a conservar su diferencia entre sus valores experimentales tanto a bajas como a altas RPM. Caso contrario a lo que sucede con el CMC de alta viscosidad donde las diferencias se hacen más notorias a altas tasas de cizalla. El incremento de viscosidad es, por lejos mucho más considerable que el de baja viscosidad.

Al aplicar altas tasas de deformación, ambos productos mantienen su diferencia en valores de viscosidad en altas concentraciones. Concentraciones intermedias menores a 15% deben ser estudiadas, así como la incidencia de la concentración crítica  $C^*$  en la diferencia de curvas de flujo para ambos tipos de polímeros

Estadísticamente, los valores de desviación de errores y el coeficiente de determinación confirman que el modelo determina de forma eficiente la caracterización reológica del fluido pseudo-plástico en estudio, aunque sería óptimo adaptar la actual investigación con otro modelo reológico, citando la Ley de Carreau–Yasuda, el cual es un modelo adaptable a un mayor rango de velocidades con la utilización de un reómetro, que a más de la obtención de curvas de flujo se pueden realizar experimentos de oscilación con el fin de determinar los módulos de almacenamiento  $G'$  y de pérdida  $G''$ , analizando de esta manera la relación entre fuerzas elásticas y viscosas de cada fluido.

Esfuerzos para analizar la deformación del fluido al variar de altas tasas de corte a bajas y viceversa deben ser consideradas. Se hace necesario realizar estudios futuros de histéresis para determinar el comportamiento tixotrópico del CMC y su afectación en el cambio de viscosidad.

Otro parámetro por considerar es la temperatura, ya que el fluido es sometido a altos grados conforme se perfora el pozo, llegando a condiciones de reservorio donde la viscosidad reduce sustancialmente su valor y los estudios de curvas de

flujo permitirían realizar operaciones de control de pozos en zonas de interés si se estudia su incidencia.

[18] N. S. Fochesatto et al., "Análisis de mezclas compatibilizadas Polipropileno-Polietileno con el Modelo Palierne," *Mecánica Comput.*, vol. XXXI, pp. 1519–1535, 2012.

#### REFERENCIAS

[1] Baroid Halliburton Company, "Manual de fluidos de perforación," Houston, USA, 2000.

[2] A. Hernandez and S. Castellón, "Análisis bibliográfico de fricción y la transferencia de calor para tubos lisos y tubos deformados mecánicamente con fluidos newtonianos y no newtonianos. Programación de las correlaciones," pp. 4–13, 1991.

[3] E. Gómez, J. Andaverde, and G. Urquiza, "Determinación de la viscosidad y su incertidumbre en fluidos de perforación usados en la construcción de pozos geotérmicos: aplicación en el campo de Los Humeros, Puebla, México," 2009.

[4] R. L. Mott, J. Enriquez Brito, and J. León Cárdenas, *Mecánica de fluidos*, 2006th ed. Prentice-Hall, 2006.

[5] T. Kanti Bandyopadhyay and S. Kumar Das, "Non-Newtonian pseudoplastic liquid flow through small diameter piping components," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 55, no. 1–2, pp. 156–166, Jan. 2007.

[6] N. O. Moraga, E. F. Castillo, and C. P. Garrido, "Non Newtonian annular alloy solidification in mould," *Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 8, pp. 1415–1424, Aug. 2012.

[7] J. J. Aklonis and W. J. MacKnight, *Introduction to polymer viscoelasticity*, 3rd ed. Wiley-Interscience, 2005.

[8] E. Ariza León, A. L. Castro Cely, and J. D. Gómez, "Factibilidad del uso del almidón de achira como agente controlador de filtrado en lodos de perforación base agua," *Rev. ION*, vol. 26, no. 1, pp. 63–71, Sep. 2013.

[9] Schlumberger, "Bentonita," 2019. [Online]. Available: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/b/bentonite.aspx>.

[10] R. S. Zea and R. Gallegos Orta, "Optimización del uso de polímeros en la perforación de pozos en campos marginales en el oriente ecuatoriano (caso bermejo)," *Escuela Superior Politécnica del Litoral*, 2001.

[11] R. Rubi Villegas, "La química de los lodos de Perforación ejemplos y aplicaciones en Ciencias de la Tierra," *Universidad Nacional Autónoma de México*, 2017.

[12] Schlumberger, "CMC - Schlumberger Oilfield Glossary," 2019. [Online]. Available: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/cmc.aspx>.

[13] M. Tomlin, "Model 35 Viscometer Instruction Manual," 2016.

[14] C. Lam and S. A. Jefferis, "Interpretation of Viscometer Test Results for Polymer Support Fluids," in *Tunneling and Underground Construction*, 2014, pp. 439–449.

[15] T. Hemphill, W. Campos, and A. Pilehvari, "Yell-power law model more accurately predicts mud rheology," *Oil&Gas*, vol. 91:34, p. 46, 1993.

[16] E. D. Soeiro Neto, "Soluções analíticas e semi-analíticas de escoamentos instacionários em meio confinado para fluidos newtonianos generalizados Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM," *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2010.

[17] E. Castillo del Barrio, "Formulaciones de tres campos de elementos finitos estabilizados en fluidos reológicamente no-newtonianos," *Universidad Politécnica de Cataluña*, 2013.