

01174

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA
CARACTERIZAR REOLÓGICAMENTE LAS LECHADAS
A BASE DE CEMENTO

TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA PETROLERA

287886

Presenta:

DAVID TRUJILLO MORALES

Director de Tesis:

ING. EUSEBIO CAPITANACHI GONZÁLEZ

DICIEMBRE DE 

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi madre Norma Morales
Gil con infinito amor y
agradecimiento, así como
a Ramiro, su fiel esposo.

A mi querida esposa, Beatriz,
e hijitos adorados:
David, Sofía Berenice e Inkery.

A mi hermano Bismarck,
mis abuelos: Avilio (q.e.p.d)
e Isabel con todo mi cariño.

**Al Ing. José C. De León Mojarro
excelente y extraordinario amigo
por sus valiosísimas motivaciones
que dieron como resultado mi
obtención del grado de Maestro
en Ingeniería.**

Con agradecimiento y respeto por
su dirección y empeño, al
C. Director de Tesis:
Ing. Eusebio Capitanachi González.

A mis distinguidos e inolvidables
maestros:

Dr. Daniel García Gavito.

Dr. Vicente Casariego González.

Dr. Fernando Samaniego Verduzco.

Dr. David de León Escobedo.

A la empresa líder en su área,
Petróleos Mexicanos a quien
debo mis estudios.

Por mi raza hablará siempre
mi espíritu y hacia la eterna
U. N. A. M.

CONTENIDO

Descripción	Página
Resumen.	
Lista de Tablas.	i
Lista de Figuras.	iii
1.- Introducción.	1
2.- Estado del Arte.	5
3.- Descripción de Modelos Reológicos.	7
3.1 Modelo plástico de Bingham.	7
3.2 Modelo de Ostwald de Waele.	10
3.3 Modelo de Herschel - Bulkley.	12
3.4 Modelo de Robertson y Stiff.	15
4.- Desarrollo del Modelo Matemático.	20
4.1 Cinética química de los cementos.	20
4.1.1 Hidratación de las fases de silicato	21
4.1.2 Hidratación de las fases de aluminato.	23
4.2 Técnicas de medición y desarrollo experimental.	24
4.2.1 Procedimientos de prueba.	24
4.2.2 Aspectos generales.	27
4.2.3 Desarrollo experimental.	31
4.2.3.1. Reacción exotérmica del cemento al contacto con el agua.	31
4.2.3.2. Determinación de las propiedades reológicas de lechadas a diferentes temperaturas.	36
4.2.3.3. Determinación de las propiedades reológicas a diferentes temperaturas de lechadas comúnmente empleadas en campos del Distrito Poza Rica de la División Norte de PEP.	43
4.3 Programa de cómputo CEMENTO NO LINEAL.	66
4.4 Derivación de ecuaciones de flujo.	69

	Página
5.- Validación del Modelo.	74
5.1 Comparación de modelos reológicos.	74
6.- Conclusiones y Recomendaciones.	84
Nomenclatura.	86
Bibliografía.	88
Apéndice A.	
Apéndice B.	

RESUMEN

Se desarrolló un modelo matemático aplicable a lechadas a base de cemento para la predicción de los esfuerzos de corte, para un máximo de 80 °C, en función de la temperatura y contenido de aditivos (controlador de filtrado y dispersante) de la mezcla. Lo anterior, dentro de un rango específico de velocidades de corte (51 a 511 seg^{-1}).

Inicialmente se hace una descripción breve de los modelos reológicos tradicionales aplicados generalmente a lechadas de cemento. Posteriormente, se describe la constitución química de los cementos y los fenómenos físicos que comúnmente se presentan. Asimismo se describe la problemática de las mediciones reológicas. La base de la experimentación que sustentará al modelo es la viscosimetría rotacional.

La parte experimental del trabajo inicia con la reacción exotérmica de la lechada generada y de cómo varían sus propiedades reológicas con respecto al tiempo y a la temperatura. Es precisamente durante este proceso donde se logran importantes observaciones que sirvieron de guía para el desarrollo experimental que precede al modelo matemático.

Con la información obtenida se procedió a aplicar la metodología existente, esto es, la técnica de ajuste no lineal con la cual se determinó la ecuación constitutiva del modelo en cuestión. En consecuencia, se derivaron las ecuaciones de flujo correspondientes para el cálculo del perfil de velocidades y gasto volumétrico.

Finalmente, se validó el modelo desarrollado comparándolo con los modelos reológicos tradicionales, encontrando su aproximación similar a la calculada mediante el modelo de Robertson y Stiff. Incluso, en el 20% del total de pruebas realizadas, en la validación del modelo resultó más exacto con relación al valor de esfuerzo de corte medido. Con respecto a los modelos de Ley de Potencias y Herschel - Bulkley es notable la mayor precisión lograda con el modelo propuesto.

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Comportamiento de la reacción exotérmica del cemento.	35
Tabla 2. Propiedades reológicas de la lechada (A).	38
Tabla 3. Propiedades reológicas de la lechada (B).	39
Tabla 4. Propiedades reológicas de la lechada (C).	40
Tabla 5. Formulación de las lechadas a utilizar en las pruebas.	45
Tabla 6. Propiedades reológicas de la lechada # 1 A.	48
Tabla 7. Propiedades reológicas de la lechada # 2 A.	48
Tabla 8. Propiedades reológicas de la lechada # 3 A.	48
Tabla 9. Propiedades reológicas de la lechada # 1.	50
Tabla 10. Propiedades reológicas de la lechada # 2.	50
Tabla 11. Propiedades reológicas de la lechada # 3.	51
Tabla 12. Propiedades reológicas de la lechada # 4.	51
Tabla 13. Propiedades reológicas de la lechada # 5.	51
Tabla 14. Propiedades reológicas de la lechada # 6.	54
Tabla 15. Propiedades reológicas de la lechada # 7.	54
Tabla 16. Propiedades reológicas de la lechada # 8.	55
Tabla 17. Propiedades reológicas de la lechada # 9.	55
Tabla 18. Propiedades reológicas de la lechada # 10.	55
Tabla 19. Propiedades reológicas de la lechada # 11.	59
Tabla 20. Propiedades reológicas de la lechada # 12.	59
Tabla 21. Propiedades reológicas de la lechada # 13.	59
Tabla 22. Propiedades reológicas de la lechada # 14.	60
Tabla 23. Propiedades reológicas de la lechada # 15.	60
Tabla 24. Propiedades reológicas de la lechada # 16.	63
Tabla 25. Propiedades reológicas de la lechada # 17.	63
Tabla 26. Propiedades reológicas de la lechada # 1 P.	74
Tabla 27. Propiedades reológicas de la lechada # 2 P.	75
Tabla 28. Propiedades reológicas de la lechada # 3 P.	75
Tabla 29. Comparación de modelos reológicos Lechada 1 P (T = 50°C)	76

	Página
Tabla 30. Comparación de modelos reológicos Lechada 1 P (T = 60°C)	76
Tabla 31. Comparación de modelos reológicos Lechada 1 P (T = 70°C)	77
Tabla 32. Comparación de modelos reológicos Lechada 1 P (T = 80°C)	77
Tabla 33. Comparación de modelos reológicos Lechada 2 P (T = 50°C)	77
Tabla 34. Comparación de modelos reológicos Lechada 2 P (T = 60°C)	78
Tabla 35. Comparación de modelos reológicos Lechada 2 P (T = 70°C)	78
Tabla 36. Comparación de modelos reológicos Lechada 2 P (T = 80°C)	78
Tabla 37. Comparación de modelos reológicos Lechada 3 P (T = 50°C)	79
Tabla 38. Comparación de modelos reológicos Lechada 3 P (T = 60°C)	79
Tabla 39. Comparación de modelos reológicos Lechada 3 P (T = 70°C)	79
Tabla 40. Comparación de modelos reológicos Lechada 3 P (T = 80°C)	80

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Curva de flujo teórica del fluido Bingham.	7
Figura 2. Curva de flujo experimental del fluido Bingham.	8
Figura 3. Determinación de parámetros reológicos del fluido Bingham.	8
Figura 4. Curvas de flujo del fluido Ley de Potencia.	11
Figura 5. Curva de flujo característica Modelo Herschel - Bulkley.	13
Figura 6. Curva de flujo característica Modelo Robertson - Stiff.	16
Figura 7. Representación esquemática de la reacción exotérmica.	22
Figura 8. Reacción exotérmica del cemento.	36
Figura 9. Reograma de la lechada (A).	41
Figura 10. Reograma de la lechada (B).	41
Figura 11. Reograma de la lechada (C).	42
Figura 12. Reograma de la lechada # 1 A, Tabla 6.	49
Figura 13. Reograma de la lechada # 2 A, Tabla 7.	49
Figura 14. Reograma de la lechada # 3 A, Tabla 8.	49
Figura 15. Reograma de la lechada # 1, Tabla 9.	52
Figura 16. Reograma de la lechada # 2, Tabla 10.	52
Figura 17. Reograma de la lechada # 3, Tabla 11.	53
Figura 18. Reograma de la lechada # 4, Tabla 12.	53
Figura 19. Reograma de la lechada # 5, Tabla 13.	53
Figura 20. Reograma de la lechada # 6, Tabla 14.	56
Figura 21. Reograma de la lechada # 7, Tabla 15.	56
Figura 22. Reograma de la lechada # 8, Tabla 16.	57
Figura 23. Reograma de la lechada # 9, Tabla 17.	57
Figura 24. Reograma de la lechada # 10, Tabla 18.	57
Figura 25. Reograma de la lechada # 11, Tabla 19.	61
Figura 26. Reograma de la lechada # 12, Tabla 20.	61
Figura 27. Reograma de la lechada # 13, Tabla 21.	61
Figura 28. Reograma de la lechada # 14, Tabla 22.	62

	Página
Figura 29. Reograma de la lechada # 15, Tabla 23.	62
Figura 30. Reograma de la lechada # 16, Tabla 24.	64
Figura 31. Reograma de la lechada # 17, Tabla 25.	64
Figura 32. Geometría y distribución de densidad de flujo de cantidad de movimiento para circulación entre placas paralelas.	70
Figura 33. Comparación de modelos reológicos. Lechada 1P (T=80°C)	81
Figura 34. Comparación de modelos reológicos. Lechada 2P (T=60°C)	82

1. INTRODUCCIÓN

La cementación es el proceso de colocar cemento en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y las formaciones expuestas del pozo. Desde su inicio en 1903, el objetivo primordial de una cementación ha sido siempre el de proporcionar aislamiento en el pozo en la zona de aceite, gas y flujos de agua. Para lograr este objetivo se debe obtener un sello hidráulico entre la tubería de revestimiento y el cemento, y entre el cemento y las formaciones, y simultáneamente prevenir canalizaciones en el seno del cemento. Este requerimiento hace de la cementación una de las más importantes operaciones de un pozo. Si no se logra este objetivo, el pozo nunca podrá alcanzar su completo potencial productor.¹

La canalización de las lechadas de cemento en el lodo de perforación es un problema de la capacidad de un fluido para desplazar otro. Debido a que los lodos de perforación y las lechadas de cemento son normalmente fluidos plásticos, el problema recae sobre las propiedades de flujo de la lechada de cemento y del efecto en su eficiencia en desplazar el lodo.²

Con las diversas prácticas de terminación de pozos, es importante tener un método relativamente simple de analizar las condiciones de flujo existentes en el pozo durante las operaciones de cementación. Esto es particularmente importante en vista de las mejoras económicas hacia donde la mayoría de los cambios han sido dirigidos. Las características reológicas de las lechadas usadas para cementar deberían de ser estudiadas cuidadosamente, sobre todo, en diámetros reducidos como 7" ó menores.³

El amplio rango de uso de lechadas de cemento densas en la industria petrolera, ha proporcionado por algún tiempo una motivación para investigar sus aspectos reológicos. Es esencial determinar el comportamiento reológico de las lechadas de cemento para evaluar apropiadamente el desplazamiento y gastos para optimizar la colocación del cemento, en operaciones de cementación de pozos.

Las lechadas de cemento son difíciles de modelar debido a la complejidad de su comportamiento reológico. Una definición minuciosa del esfuerzo cortante y las propiedades dependientes del tiempo de lechadas de cemento ya ha sido completamente realizado. Los factores que afectan el comportamiento reológico de estas lechadas y la interpretación de tal comportamiento incluyen lo siguiente:⁴

- características físicas de la lechada; por ejemplo , relación agua/cemento, tamaño, distribución y forma de la partícula;
- características químicas de la lechada, la consideración principal es la que se relaciona con las reacciones químicas (hidratación) de las partículas de cemento dentro de la lechada;
- condiciones de mezclado (tipo, tiempo y velocidad de mezclado de la lechada debe ser consistente durante toda la prueba);
- condiciones de medición; éstas pueden ser el factor fundamental en que difieren los procedimientos experimentales por lo que deberán detallarse en forma precisa las condiciones bajo las cuáles se realizan las pruebas y estandarizar las mismas.

Actualmente los viscosímetros rotacionales se utilizan normalmente para la determinación del comportamiento reológico de las lechadas de cemento. Los tipos más comunes de viscosímetros rotacionales son: el viscosímetro de cilindros coaxiales y el viscosímetro de cono y plato. Puesto que las lechadas densas de cemento son sistemas dispersos, los viscosímetros de cilindros coaxiales se prefieren con respecto a los viscosímetros de cono y plato. Por otro lado, los fenómenos de fricción entre las partículas se evitan y las condiciones de flujo son más cercanas a las determinadas en el viscosímetro. El viscosímetro de cilindros coaxiales está diseñado para medir el esfuerzo de corte, a una velocidad dada, de un fluido presente en el espacio anular entre dos cilindros concéntricos. Durante la operación, un cilindro rota y el otro está estacionario. Las mediciones de la velocidad angular del cilindro rotando y el torque aplicado al cilindro fijo se usan para construir la curva de flujo esfuerzo de corte contra velocidad de corte.⁴

Un viscosímetro de cilindros coaxiales presenta desventajas cuando se miden las propiedades reológicas de suspensiones muy pesadas como es el caso de lechadas de cemento con densidades mayores de 2.00 gr/cm^3 . El asentamiento de partículas durante la medición puede interpretarse como un adelgazamiento de corte anómalo, que puede ser atribuido a un incremento o decremento de viscosidad (relacionado a una construcción ó ruptura estructural). Dependiendo de la separación que haya entre los cilindros, puede ocurrir la distribución de flujo desigual en la sección transversal del espacio anular. Una preocupación principal con los viscosímetros coaxiales, es un resbalamiento aparente que ocurre en las paredes de los cilindros lo cuál provoca que una parte de la lechada fluya y otra parte permanezca como un tapón. El resbalamiento en las lechadas es a menudo atribuido a una migración de partícula que se alojan en la superficie del recipiente cuando el fluido se encuentra en movimiento por la acción de rotación del cilindro.⁴

El cemento Portland¹ es usado generalmente en las operaciones de cementación de pozos. Las condiciones a las cuales los cementos Portland son expuestas en un pozo, difieren significativamente de aquellas encontradas a las condiciones ambientales en la industria de la construcción; como resultado de ello, los cementos especiales Portland son fabricados para uso como cementos para pozos petroleros y geotérmicos.

El cemento Portland es el ejemplo más común de un cemento hidráulico. Estos se colocan y desarrollan esfuerzo compresivo como un resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento. El fraguado y endurecimiento ocurre no solamente si la mezcla cemento/agua es dejada expuesta al aire, también en seno de agua. El desarrollo del fraguado es previsible, uniforme y relativamente rápido. El cemento fraguado tiene también baja permeabilidad y es casi insoluble en agua; por lo tanto, su contacto con el agua no destruye el material endurecido. Estos atributos son esenciales para que un cemento logre y mantenga el aislamiento de la zona.

Las fórmulas químicas¹ de los cementos pueden ser expresadas como una suma de óxidos; por ejemplo, silicato tricálcico, Ca_3SiO_5 que puede ser escrito como $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Las abreviaciones más comúnmente encontradas para los óxidos son tales como C para CaO y S para SiO_2 . Entonces Ca_3SiO_5 llega a ser C_3S .

El cemento Portland consiste principalmente de cuatro componentes: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y aluminoferrito tetracálcico (C_4AF). Estos componentes se forman en un horno por medio de una serie de reacciones a temperaturas tan altas como $1500\text{ }^\circ\text{C}$ entre cal, sílice, alúmina y óxido de hierro.

En el proceso de fabricación se seleccionan materias primas que son molidas finamente, por lo que se obtiene una mezcla con la composición química deseada. Después del mezclado, la combinación de materia prima se introduce a un horno y se convierte en escoria de cemento. La escoria se enfría y se agrega una pequeña cantidad de yeso (3% a 5%) y se pulveriza la mezcla. El producto así pulverizado es finalmente el cemento Portland.

2. ESTADO DEL ARTE.

Una investigación de las características de flujo de las lechadas de cemento indica, que éstas se comportan esencialmente como fluidos plásticos y que exhiben tres regiones de flujo a saber: tapón, laminar y turbulento. En 1948, Howard y Clark ², demostraron que las lechadas de cemento en flujo tapón desplazan solamente el 60 % del lodo que se va a desplazar; mientras que del 90 al 95 % puede ser desplazado por lechadas en flujo laminar y turbulento.

En 1957, Melton ⁶ y colaboradores se abocaron a la predicción del comportamiento de fluidos no Newtonianos tanto en flujo laminar como turbulento a lo largo de tuberías circulares. La naturaleza fundamental de su método de análisis de las propiedades reológicas de estos fluidos fue además demostrada al evaluar la precisión con la cuál las mediciones se efectuaron, empleando un numero adimensional, basado en la correlación del factor de fricción de Fanning - Número de Reynolds.

Slagle ⁷, en 1962, definió una serie de cálculos reológicos los cuales resultaron prácticos y de gran ayuda en la selección de un programa de cementación, empleando un método de laboratorio relativamente sencillo y usando un viscosímetro estándar. Así mismo, propuso un criterio de determinación para condiciones de flujo laminar.

En 1967, McLean ⁸ y colaboradores encontraron que en un espacio anular excéntrico, el cemento puede fluir por el camino más ancho y evitar el movimiento del lodo más lento en el camino más angosto. La tendencia del cemento a evitar el lodo, es una función de la geometría del espacio anular, la densidad y propiedades de flujo del lodo, cemento y el gasto empleado.

Un requisito para una cementación exitosa, es el desplazamiento completo del lodo de perforación del espacio anular. Con este concepto, en 1973, Clark y Carter ⁴, retomaron la idea y la examinaron bajo condiciones simuladas de fondo de pozo, considerando la importancia relativa de las fuerzas operantes durante el desplazamiento del cemento al espacio anular. La fuerza de flotación resultante de la diferencia de densidad cemento-lodo, tiene menos efecto en el

desplazamiento del lodo que el esperado bajo las condiciones simuladas de fondo de pozo.

Una aportación importante fue la realizada por Robertson y Stiff⁹, en 1975, cuando propusieron un modelo pseudoplástico con punto de cedencia, el cual proporcionó descripciones exactas de la reología de las lechadas de cemento. Derivaron relaciones explícitas sencillas entre la velocidad de corte en la pared y el gasto volumétrico tanto en tubería como en espacio anular.

En Septiembre de 1976, Zamora y Bleier¹⁰ ajustaron un modelo reológico basado en el modelo de Herschel-Bulkley (1926) para los lodos de perforación, aunque difícil de aplicar con exactitud teórica. Lo relevante de este trabajo resulta del hecho de simplificar un modelo y darle aplicación de campo.

Beirute y Flumerfelt¹¹ en 1977, evaluaron el modelo reológico de Robertson y Stiff⁹ para lechadas a base de cemento. Lo compararon con el modelo de Herschel-Bulkley concluyendo que era un modelo mejorado. Las ecuaciones para gastos volumétricos en espacios anulares reducidos y tuberías de diámetro pequeño, están limitadas para fluidos sin punto de cedencia. Desarrollaron ecuaciones más generales que incluyen los resultados de Robertson y Stiff⁹ como casos particulares.

A inicios de 1983, Gucuyener¹² desarrolló un modelo de tres constantes que describía el comportamiento reológico de fluidos de perforación y lechadas a base de cemento. Así mismo, derivó las ecuaciones respectivas de flujo basadas en el modelo propuesto tanto para flujo en tubería como en espacio anular.

La reología de las lechadas a base de cemento es una función del tamaño de partícula, la concentración y las reacciones específicas durante el fraguado del cemento. Esto complica grandemente el análisis de los datos obtenidos en un experimento reológico. Para separar la contribución de la lechada a la reología del sistema de la reacción química, se estudió en 1988 una lechada de partículas de polvo de mármol por Clark y Shaughnessy⁴.

3. DESCRIPCIÓN DE MODELOS REOLÓGICOS.

3.1. Modelo plástico de Bingham¹³.

Definición y curva típica.

En los fluidos plásticos de Bingham el esfuerzo de corte varía linealmente con la velocidad de corte pero, a diferencia de los fluidos Newtonianos, debe aplicarse una fuerza mínima para iniciar el movimiento. Esta fuerza, es conocida como el punto de cedencia o valor de cedencia. Tales fluidos están caracterizados por dos constantes:

(a) Punto de cedencia, τ_0 , el cuál corresponde a la fuerza mínima requerida para poner el fluido en movimiento.

(b) Viscosidad plástica, μ_p , que es la relación entre el incremento en el esfuerzo de corte y el correspondiente incremento en la velocidad de corte (γ), esto es, la pendiente de la curva obtenida al graficar τ como una función de γ .

La ecuación teórica de flujo del fluido es:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \quad (1)$$

En coordenadas cartesianas, esto es una línea recta, como se muestra en la Figura 1. Las curvas experimentales obtenidas con un viscosímetro de cilindros coaxiales no son estrictamente rectilíneas, como se muestra en la Figura 2. En realidad, la Ec. 1 no es aplicable en la zona de flujo tapón.

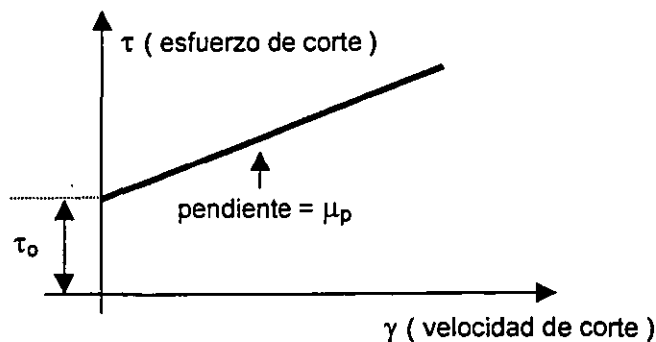


Figura 1. Curva de flujo teórica del fluido Bingham.

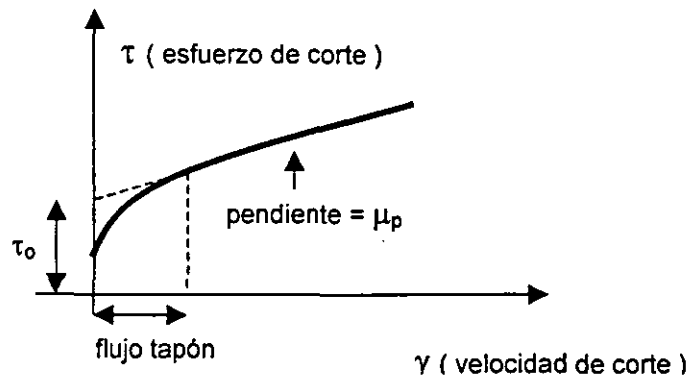


Figura 2. Curva de flujo experimental del fluido Bingham.

Determinación de viscosidad plástica μ_p y punto de cedencia τ_0 .¹³

Estas determinaciones son llevadas a cabo en un viscosímetro Fann de acuerdo al reporte API RP10B²⁰. Los valores por determinarse son el esfuerzo de corte τ_{1022} a la velocidad de corte $\gamma_2 = 1022 \text{ seg}^{-1}$ (a 600 rpm) y el esfuerzo de corte τ_{511} a la velocidad de corte $\gamma_1 = 511 \text{ seg}^{-1}$ (a 300 rpm). Estos valores se ilustran en la Figura 3.

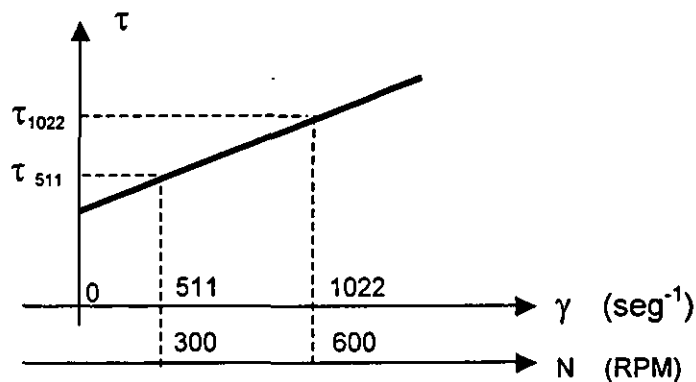


Figura 3. Determinación de parámetros reológicos del fluido Bingham.

La determinación de la viscosidad plástica (también conocida como V_p) y el punto de cedencia se basa en las lecturas a 600 y 300 rpm. Evaluando el modelo de Bingham en estas lecturas:

$$\tau_{600} = (V_p / g_c) \gamma_{600} + \tau_y$$

(8)

$$\tau_{300} = (V_p / g_c) \gamma_{300} + \tau_y$$

resolviendo las dos ecuaciones anteriores para la viscosidad plástica y considerando:

$$g_c = 32.17 [\text{lb}_m \cdot \text{pie} / \text{lb}_f \cdot \text{seg}^2]$$

$$\tau_{600} = \theta_{600} [\text{lb}_f / 100 \text{ pies}^2]$$

$$\tau_{300} = \theta_{300} [\text{lb}_f / 100 \text{ pies}^2]$$

$$\gamma_{600} = 600 \text{ rpm}$$

$$\gamma_{300} = 300 \text{ rpm}$$

$$\tau = 1.067 \theta [\text{lb}_f / 100 \text{ pies}^2]$$

$$\gamma = 1.703 N [\text{seg}^{-1}]$$

$$V_p = g_c \left[\frac{\tau_{600} - \tau_{300}}{\gamma_{600} - \gamma_{300}} \right]$$

Substituyendo valores:

$$V_p = \frac{(32.17)(1.067)(\theta_{600} - \theta_{300})}{100(1.703)(300)}$$

$$V_p = 0.000672 (\theta_{600} - \theta_{300}) \quad [\text{lb}_m / \text{pie} - \text{seg}]$$

Y considerando :

$$1 \text{ cp} = 0.000672 \text{ lb}_m / \text{pie} - \text{seg}$$

$$V_p = \theta_{600} - \theta_{300} \quad [\text{cp}]$$

El punto de cedencia se obtiene del modelo de Bingham evaluado a 300 rpm, substituyendo el valor de V_p y resolviendo para τ_y de donde:

$$\tau_y = \tau_{300} - \left[\frac{\tau_{600} - \tau_{300}}{\gamma_{600} - \gamma_{300}} \right] \gamma_{300}$$

$$\tau_y = \tau_{300} - \left[\frac{\tau_{600} - \tau_{300}}{600 - 300} \right] 300$$

$$\tau_y = \tau_{300} - [\tau_{600} - \tau_{300}]$$

Considerando que $\tau = \theta$:

$$\tau_y = \theta_{300} - (\theta_{600} - \theta_{300})$$

Finalmente,

$$\tau_y = \theta_{300} - V_p \quad [\text{lb} / 100 \text{ pies}^2]$$

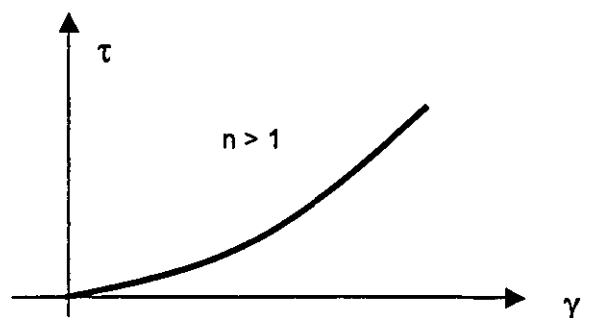
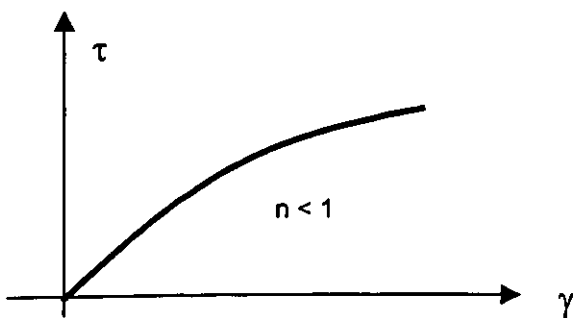
3.2 Modelo de Ostwald de Waele¹³.

También llamado Ley de Potencia. En este caso el esfuerzo de corte no es proporcional a la velocidad de corte, pero lo es a la enésima potencia, de allí su nombre genérico. El modelo requiere de dos parámetros para la caracterización del fluido y se define mediante la ecuación siguiente:

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

donde "K" es el índice de consistencia [lb*segⁿ / 100 pies²] y "n" es el índice de comportamiento de flujo.

El modelo de la Ley de Potencia puede emplearse para representar un fluido pseudoplástico (n<1), un Newtoniano (n=1) ó un dilatante cuando n>1. La desviación del índice de comportamiento de flujo caracteriza el grado al cuál el fluido es no Newtoniano.



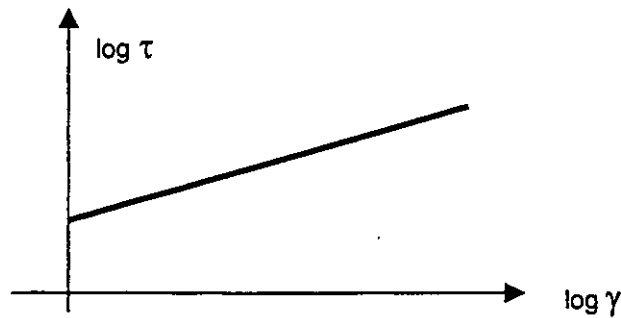


Figura 4. Curvas de flujo del fluido Ley de potencia.

No obstante que el modelo de Ley de potencia es eminentemente empírico, ha sido ampliamente utilizado, debido a que a gradientes de velocidad intermedios reproduce adecuadamente el comportamiento de flujo de muchos fluidos seudoplásticos y dilatantes. Otra ventaja en el uso de este modelo, lo constituye el hecho de que es simple y posee sólo dos constantes reológicas (n y K); además de que cuando ha sido empleado en problemas de flujo en tuberías ha dado excelentes resultados¹³.

Determinación de los parámetros reológicos¹³.

A partir de la ecuación constitutiva del modelo evaluada a 600 y 300 rpm, resultan:

$$\tau_{600} = K \gamma^n_{600}$$

$$\tau_{300} = K \gamma^n_{300}$$

las cuales pueden ser resueltas simultáneamente. Así, para el índice de comportamiento de flujo, se tiene:

$$n = \frac{\log [\tau_{600} / \tau_{300}]}{\log [\gamma_{600} / \gamma_{300}]}$$

y con base en las lecturas Fann y revoluciones por minuto:

$$n = \frac{\log [\theta_{600} / \theta_{300}]}{\log (2)}$$

$$n = 3.32 \log [\theta_{600} / \theta_{300}] \quad [\text{Adimensional}]$$

Ahora, despejando K del modelo:

$$K = \frac{\tau}{\gamma^n}$$

y suponiendo que $\tau = \theta$:

$$K = \frac{\theta_{600}}{1022^n} = \frac{\theta_{300}}{511^n} \quad [\text{lb} \cdot \text{seg}^n / 100 \text{ pies}^2]$$

3.3. Modelo de Herschel - Bulkley ¹³.

También conocido como modelo de Ley de Potencias con Punto de cedencia o Ley de Potencias Modificado, fue propuesto con el fin de obtener una relación más estrecha entre el modelo reológico y las propiedades de flujo de los fluidos seudoplásticos y dilatantes que presentan un punto de cedencia.

Entre los modelos propuestos que involucran el uso de tres constantes o parámetros ajustables, el modelo de Herschel - Bulkley es de los más simples y exactos. Este modelo está representado por:

$$\tau - \tau_y = K \gamma^n \quad (3)$$

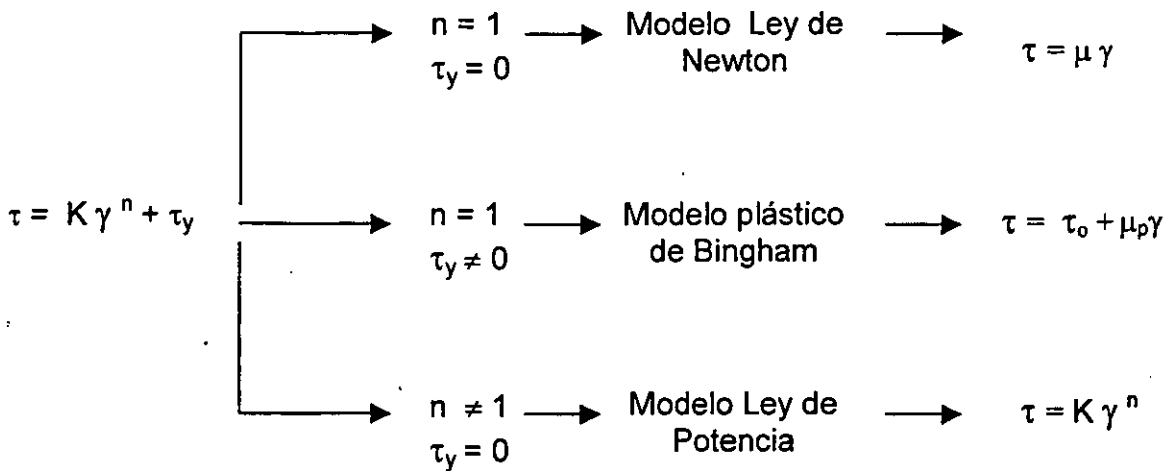
con:

$$\begin{array}{lll} \gamma = 0 & \text{si} & \tau \leq \tau_y \\ \gamma \neq 0 & \text{si} & \tau > \tau_y \end{array}$$

donde τ_y representa un esfuerzo inicial o punto de cedencia.

Las constantes n y k tienen un significado similar a las constantes reológicas del modelo Ley de Potencias.

A continuación se establece el porqué este modelo representa un caso general de los modelos ya descritos, incluyendo el Modelo de Ley de Newton.



Por definición ⁷, un fluido que se ajusta a este modelo puede ser descrito como aquel que en una gráfica logarítmica ($\tau - \tau_y$) contra γ en la región laminar es una línea recta. Para esto, se tomaron pocos datos a velocidades extremadamente bajas, donde podría esperarse alguna desviación. Sin embargo, las velocidades de corte extremadamente bajas pocas veces se presentan en la práctica.

Sobre la base de lo anterior, se describe el comportamiento en la Figura 5.

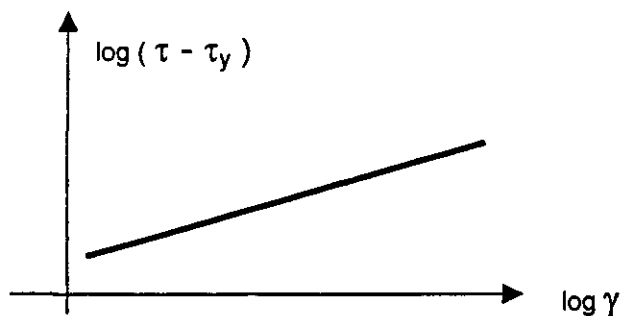


Fig. 5 Curva de flujo característica Modelo Herschel - Bulkley.

Determinación de los parámetros reológicos.¹³

Este modelo presenta tres parámetros reológicos, lo cual hace difícil la evaluación de los mismos. Por lo que, para su solución es necesario suponer:

$$\tau = \theta \quad \text{y} \quad \tau_y = \theta_0$$

donde θ_0 es el valor de gelatinosidad (gel) inicial; considerando en este caso como una aproximación al verdadero valor de τ_y . Esto elimina una incógnita y siendo valores muy cercanos no se pierde mucha aproximación.

Mediante la evaluación del modelo a 600 y 300 rpm se tiene:

$$\tau_{600} = K \gamma^n_{600} - \tau_y$$

$$\tau_{300} = K \gamma^n_{300} - \tau_y$$

Resolviendo simultáneamente ambas ecuaciones, resulta:

$$n = \frac{\log [\tau_{600} - \tau_y / \tau_{300} - \tau_y]}{\log [\gamma_{600} / \gamma_{300}]}$$

y en función de las lecturas del viscosímetro y las revoluciones por minuto:

$$n = \frac{\log [\theta_{600} - \theta_0 / \theta_{300} - \theta_0]}{\log (2)}$$

$$n = 3.32 \log [\theta_{600} - \theta_0 / \theta_{300} - \theta_0] \quad \text{[Adimensional]}$$

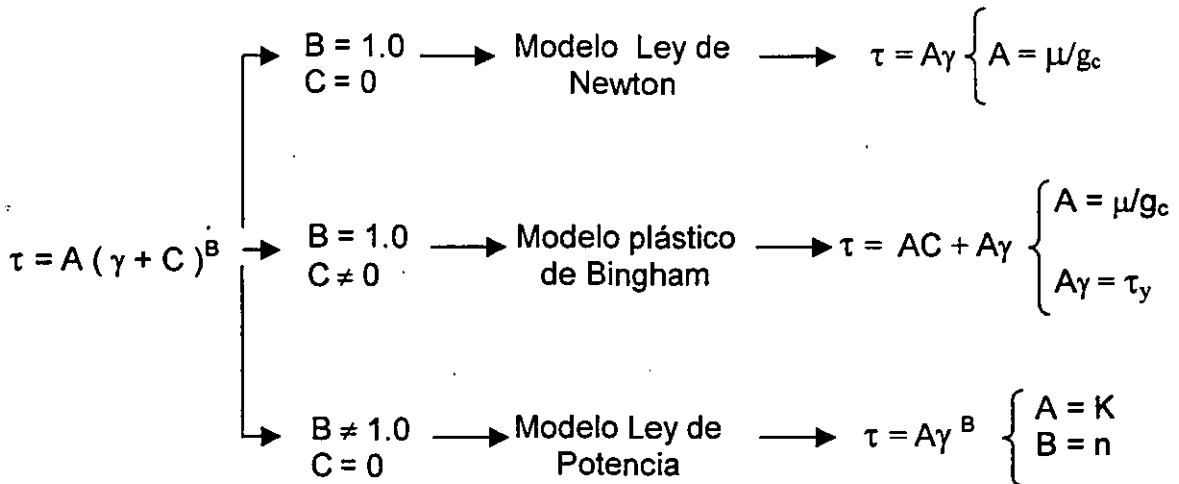
Así mismo, despejando k del modelo.

$$k = \frac{\tau - \tau_y}{\gamma^n}$$

y en función de las lecturas, suponiendo que $\tau = \theta$ y $\tau_y = \theta_0$:

velocidad de corte, que sería requerida por un fluido de Ley de Potencias para producir el mismo esfuerzo cortante.

Como una característica adicional ⁹, los valores de las constantes caracterizan el fluido. Entonces puede decirse que:



Es evidente que la forma logarítmica de la Ec. (4) delinea una línea recta en coordenadas logarítmicas :

$$\log \tau = \log A + B \log (\gamma + C)$$

De este modo, si graficamos τ contra $(\gamma + C)$ en coordenadas logarítmicas, B representa la pendiente de la recta y A es la ordenada al origen. Lo anterior se describe en la Fig. 6.

Determinación de las constantes reológicas. ⁹

A diferencia de los demás modelos, para la determinación de los parámetros del modelo de Robertson y Stiff se utilizan todas las lecturas proporcionadas por el viscosímetro (6 ó 12 lecturas, dependiendo del modelo de viscosímetro empleado).

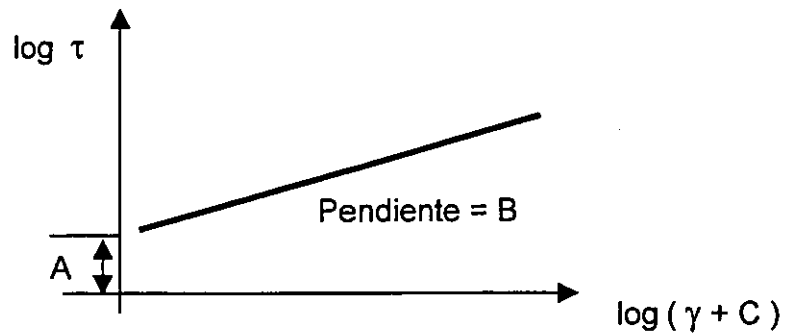


Fig. 6. Curva de flujo característica Modelo Robertson y Stiff.

Para evaluar los parámetros, se grafica el esfuerzo de corte correspondiente a las velocidades de corte. Definiendo la media geométrica del esfuerzo cortante como:

$$\tau_m = (\tau_{\max} \tau_{\min})^{1/2}$$

donde τ_{\max} y τ_{\min} corresponden a los valores de los esfuerzos cortantes a la velocidad de corte máxima y mínima respectivamente (γ_{\max} y γ_{\min}).

Por lo tanto, es posible evaluar el modelo a las condiciones máxima, mínima y media :

$$\tau_{\max} = A (\gamma_{\max} + C)^B$$

$$\tau_{\min} = A (\gamma_{\min} + C)^B$$

$$\tau_m = A (\gamma_m + C)^B$$

donde γ_m es el valor de la velocidad de corte correspondiente a τ_m , obtenida de una gráfica de τ contra γ .

Dividiendo τ_{\max} y τ_{\min} por τ_m , multiplicando estas dos expresiones resultantes entre sí y elevando el resultado a la $1/B$, resulta:

$$\left[\frac{\tau_{\max} \tau_{\min}}{\tau_m^2} \right]^{1/B} = \frac{A^{1/B} (\gamma_{\max} + C) A^{1/B} (\gamma_{\min} + C)}{\left[A^{1/B} (\gamma_m + C) \right]^2}$$

y de acuerdo a la definición previamente dada de τ_m :

$$\tau_m^2 = \tau_{\max} \tau_{\min}$$

de donde,

$$1 = \frac{(\gamma_{\max} + C)(\gamma_{\min} + C)}{(\gamma_m + C)^2}$$

y despejando C resulta:

$$C = \frac{\gamma_{\max} \gamma_{\min} - \gamma_m^2}{2\gamma_m - \gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \quad \left(\frac{1}{\text{seg}} \right)$$

Una vez determinada C, de la Fig. 6 se puede decir que:

$$P = \log(\gamma + C)$$

$$Q = \log(\tau)$$

y empleando mínimos cuadrados:

$$B = \frac{Nd \sum_1^{Nd} (PQ) - \sum_1^{Nd} P \sum_1^{Nd} Q}{Nd \sum_1^{Nd} P^2 - \left\{ \sum_1^{Nd} P \right\}^2} \quad \left[\text{Adimensional} \right]$$

$$A' = \frac{1}{Nd} \left\{ \sum_1^{Nd} Q - B \sum_1^{Nd} P \right\}$$

donde Nd es el número de datos empleados. Entonces :

$$A = 10^{A'} \quad \left(\frac{\text{lb} - \text{seg}^B}{100 \text{ pies}^2} \right)$$

Además, definiendo a τ y γ como:

$$\tau = 1.067 \theta \quad \left[\text{lb} / 100 \text{ pies}^2 \right]$$

$$\gamma = 1.703 N \quad \left[\text{seg}^{-1} \right]$$

Finalmente, el punto de cedencia, aunque no explícitamente, es expresado por:

$$\tau = AC^B \quad \left[\text{lb} / 100 \text{ pies}^2 \right]$$

4. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO.

4.1. Cinética química de los cementos.¹

La cinética química se ocupa de la velocidad de las reacciones y de su mecanismo. El término velocidad de reacción se utiliza para expresar la mayor o menor rapidez con que se producen las transformaciones químicas, y el término mecanismo de reacción indica la secuencia de etapas a través de las cuales tiene lugar la reacción total. En la mayoría de las reacciones se ponen de manifiesto únicamente las sustancias iniciales y las que aparecen como productos finales, esto es, sólo es observable la reacción neta o global. Ahora bien: esta reacción neta no representa en general toda la historia del proceso, sino tan solo la suma de los cambios ocurridos en él. Las transformaciones netas constan muchas veces de varias reacciones consecutivas cada una de las cuales es un paso hacia la formación de los productos finales.

Cuando una reacción tiene lugar en etapas, en algunas de ellas se forman probablemente especies químicas intermedias, que no se ponen de manifiesto porque las consumen las etapas siguientes. Sin embargo, investigando la influencia que ejercen distintos factores sobre la velocidad de la transformación total, resulta a veces posible averiguar cuáles son los productos intermedios y cómo intervienen en el mecanismo de la reacción.

Experimentalmente se demuestra que los factores más importantes que influyen en la velocidad de una reacción química son cuatro: naturaleza de las sustancias reaccionantes, concentración, temperatura y catálisis.

Observaciones efectuadas en diferentes pruebas de laboratorio indican que la elevación de temperatura en reacciones endotérmicas aumenta la velocidad de reacción, y que la disminución del mismo factor provoca un descenso en dicha velocidad. En el caso de las lechadas de cemento, donde se presenta una reacción exotérmica, inhibe la velocidad de reacción.

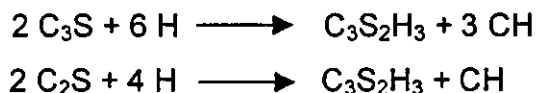
La investigación respecto a la hidratación del cemento consiste principalmente del estudio del comportamiento de los componentes individuales del cemento en un ambiente acuoso y relacionando los resultados con el

comportamiento del sistema multicomponente que representa. Los componentes principales del cemento (C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF) exhiben diferente cinética de hidratación y forman diferentes productos de hidratación.

4.1.1. Hidratación de las fases de Silicato.¹

Las fases de silicato en el cemento son las más abundantes, a menudo comprenden más del 80% del material total. C_3S es el constituyente principal, con una concentración de hasta el 70%. La cantidad de C_2S normalmente no excede del 20%.

Como se muestra en las ecuaciones químicas siguientes, los productos de hidratación para ambas fases son hidrato silicato de calcio e hidróxido de calcio (también conocido como portlandita).



El hidrato silicato de calcio no tiene la composición exacta de $C_3S_2H_3$; en cambio, las relaciones C: S y H: S son variables dependiendo de factores tales como la concentración de calcio en la fase acuosa, temperatura, la presencia de aditivos y tiempo. El material es casi amorfo y es llamado comúnmente "gel C-S-H". Está compuesto aproximadamente de 70% de cemento completamente hidratado a condiciones ambientes y es considerado como el principal factor en el endurecimiento del cemento. En contraste, el hidróxido de calcio es altamente cristalino y se presenta como placas hexagonales. Su aportación en dicho factor está entre 15 a 20%.

Después de una vigorosa pero breve hidratación inicial cuando se agrega agua, las fases de silicato experimentan un período de baja reactividad, llamado el "período de inducción". Por lo tanto, no influyen significativamente la reología de la lechada de cemento. La hidratación substancial finalmente continúa y el ritmo de hidratación del C_3S supera al C_2S por un amplio margen. Debido a su abundancia y a la formación masiva de gel C-S-H, la hidratación del C_3S es en gran parte responsable del inicio del fraguado y desarrollo de la resistencia. La

hidratación del C_2S es significativa solamente en términos de la resistencia final del cemento una vez fraguado.

La hidratación del C_3S es un proceso exotérmico; por lo tanto, el ritmo de hidratación puede ser seguido por calorimetría de conducción. Del termograma dado en la Figura 7, se pueden establecer cinco etapas de hidratación, a saber,

- I. Período de preinducción.
- II. Período de inducción.
- III. Período de aceleración.
- IV. Período de desaceleración.
- V. Período de difusión.

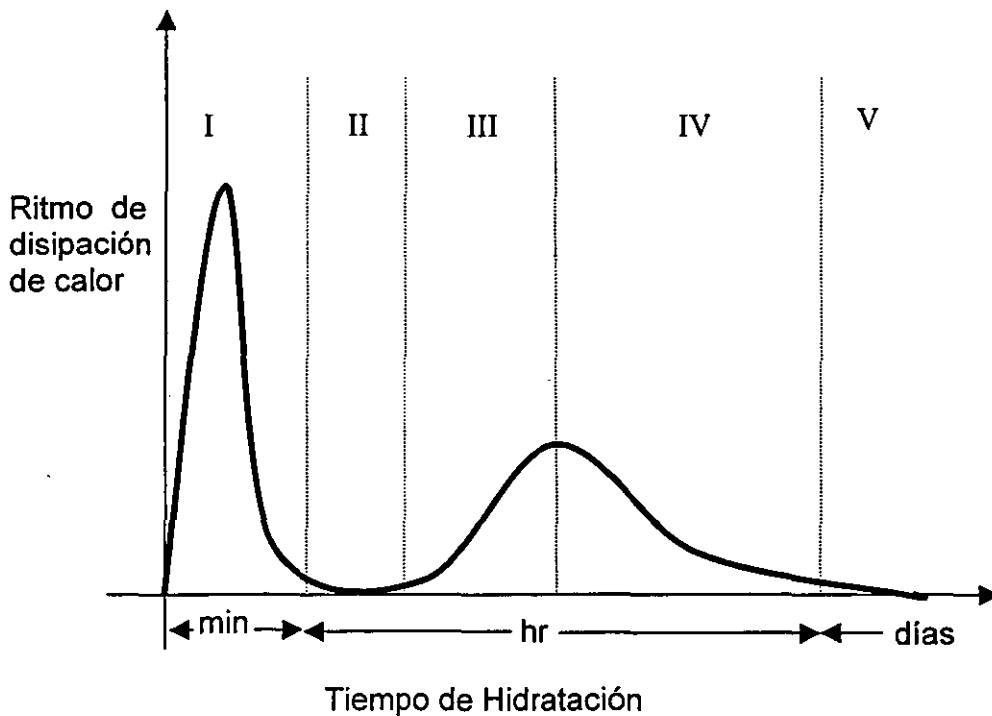
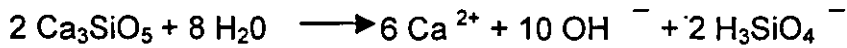


Figura 7. Representación esquemática de la reacción exotérmica.

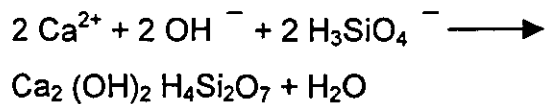
La duración del período de preinducción es de solamente unos pocos minutos, durante e inmediatamente siguiendo al mezclado. Una gran exoterma es observada en este tiempo, resultado de la mojabilidad del polvo y la rapidez de la

hidratación inicial. Desde un punto de vista físico, una capa inicial de gel C-S-H se forma sobre las superficies del anhidro C_3S .

Cuando el C_3S contacta con el agua, ocurre un intercambio de protones superficiales llevando a la transformación de los iones O^{2-} y SiO_4^{4-} en la primera capa del enrejado de cristal dentro de los iones OH^- y $H_3SiO_4^-$. Esta reacción casi instantánea es inmediatamente seguida por la disolución congruente de la superficie cargada de protones, de acuerdo a la ecuación siguiente



La solución se sobresatura muy rápidamente con respecto al gel C-S-H y ocurre la precipitación del mismo.

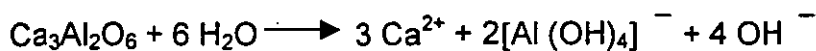


Durante el período de inducción se observa relativamente poca hidratación. El ritmo de liberación de calor cae dramáticamente. Cuando se alcanza finalmente la sobresaturación crítica, la precipitación de hidróxido de calcio empieza a ocurrir. Se observa un reinicio de hidratación significativa, señalando con esto el final del período de inducción. A temperaturas ambientes, la duración del período de inducción es de unas pocas horas.

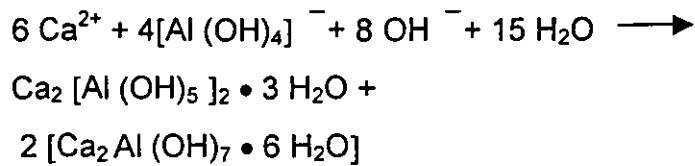
Los períodos de aceleración y desaceleración se presentan durante el fraguado de cemento, en tanto que finalmente se tiene el período de difusión.

4.1.2. Hidratación de las fases de Aluminato.¹

Las fases de aluminato, especialmente C_3A son las más reactivas en períodos cortos de hidratación. Aunque su abundancia es considerablemente más baja que la de los silicatos, tienen una influencia significativa sobre la reología de las lechadas de cemento y con anticipación desarrollan dureza del cemento, principalmente hidratos de C_3A . La hidratación del C_4AF es muy similar a la del C_3A , pero mucho más lenta.



La solución se sobresatura rápidamente con respecto a algunos hidratos aluminatos de calcio, llevando a su precipitación



Sumando ambas ecuaciones obtenemos,



La temperatura es uno de los factores que mayormente afectan la hidratación del cemento. El ritmo de hidratación, la naturaleza, estabilidad y morfología de los productos de la hidratación son fuertemente dependientes de este parámetro.

4.2 Técnicas de medición y desarrollo experimental.

4.2.1. Procedimientos de prueba.

En el estudio del comportamiento reológico de las lechadas de cemento¹, se ha encontrado que en lechadas dispersas el modelo plástico de Bingham proporciona una descripción aproximada de las propiedades en el rango comprendido entre 30 y 300 rpm a temperatura ambiente. Sin embargo debajo de este rango las lecturas están afectadas por el resbalamiento aparente en la pared y por arriba del mismo, se tiende a sobrestimar el esfuerzo de corte. Vale la pena mencionar que la práctica común de usar solamente dos lecturas altas de velocidad rotacional para determinar los parámetros reológicos de un modelo dado puede a menudo llevar a conclusiones erróneas.

De acuerdo a los procedimientos de medición con propósitos reológicos, es común encontrarse con algunos problemas que pudieran representar resultados no esperados. A continuación se enlistan algunos de estos inconvenientes.

Efectos finales.

Con equipo de campo estándar (caso del viscosímetro Fann Modelos 35 ó 70), el factor de corrección recomendado por tal efecto es de 1.064. En realidad está incluido en la constante de calibración del resorte, que es 1.064 veces más bajo que la constante nominal. Este valor está de acuerdo con las medidas realizadas en aceites Newtonianos por Mannheimer¹⁴. En pruebas

realizadas por Nelson¹, se encontró que los efectos finales pueden explicar hasta 16% del torque medido cuando se prueban lechadas de cemento. Desafortunadamente, actualmente no hay un claro entendimiento de cómo los efectos finales varían con el comportamiento no-Newtoniano; esto es, no existe un procedimiento tal para tomarlos en cuenta de una manera sistemática. Sin embargo, cuando se tratan de comparar resultados obtenidos con diferentes instrumentos, uno debe estar consciente de que los efectos finales puedan explicar las diferencias en los esfuerzos de corte medidos.

Resbalamiento en la pared.¹⁴

Puede decirse que, una vez que se han convertido los datos esfuerzo de corte / velocidad de corte a relación torque/velocidad angular para un fluido dado, debería de ser independiente del tamaño del espacio anular. Varios autores^{6, 15} han mostrado que éste no es siempre el caso con las lechadas de cemento, en particular a velocidades de corte bajas. No representa una cuestión sencilla la interpretación correcta de este fenómeno. Una de las explicaciones posibles lo es el hecho de que el fluido no es homogéneo a lo largo de todo el espacio anular. En particular, cerca de las paredes del reómetro, donde la concentración de partículas de cemento es más pequeña que en todo el volumen de fluido.

Por otro lado, el efecto de resbalamiento de pared pudo explicarse con la realización de experimentos con radios de cilindro interior diferentes. Este análisis aún no ha sido validado. En sus primeras pruebas, Mannheimer¹⁵, encontró despreciable el efecto de la velocidad de resbalamiento arriba de un esfuerzo de corte dado. Otra aproximación del fenómeno consistió en tratar de minimizar el efecto, usando superficies cilíndricas ranuradas. Sin embargo la veracidad del procedimiento con lechadas de cemento resultó cuestionable toda vez que los esfuerzos de corte medidos dependían de la profundidad de las ranuras.

Haimoni¹ trató de combinar estas dos aproximaciones (esto es, variando el tamaño del espacio anular y la rugosidad de las superficies de los

cilindros) mientras hacía mediciones con el mismo fluido. Aunque no pudo proponer un método para explicar el resbamiento aparente en la pared, concluyó que este fenómeno parece tener consecuencias despreciables en las medidas realizadas en un viscosímetro de cilindros coaxiales, una vez que ha desaparecido el flujo tapón.

Migración de partícula.¹

La migración de partícula debida a las fuerzas gravitacionales o centrífugas también puede afectar las medidas reológicas. Para que los resultados sean representativos, el fluido de prueba no debería segregarse (separarse) durante la medición. Antes de medir las propiedades reológicas de una lechada de cemento, es esencial asegurarse que la segregación de partícula no ocurre bajo condiciones estáticas (produciendo agua libre y sedimentación). Desafortunadamente, esto no necesariamente significa que no ocurrirá bajo condiciones dinámicas porque

- la viscosidad aparente del fluido generalmente decrece con el esfuerzo, y
- bajo condiciones dinámicas, las fuerzas centrífugas pueden ser más grandes que las fuerzas gravitacionales.

Sedimentación.

La sedimentación puede presentarse al realizar mediciones reológicas con el equipo de campo, dichas mediciones no son fuertemente afectadas, a menos que el problema sea extremadamente severo. En primer lugar, el volumen estático de fluido abajo del cilindro interior asegura que, si la sedimentación está ocurriendo, la concentración de partículas de cemento en el espacio anular entre taza y rotor no disminuye instantáneamente como sería en el caso de una sedimentación. En segundo lugar, cuando se pasa de una alta velocidad rotacional a una baja, ó viceversa, es probable que el movimiento vertical del fluido establecido en dicho espacio anular impida la sedimentación. Por último, a una velocidad rotacional constante, el fluido de prueba es sometido a una fuerte circulación de bombeo a través del espacio anular.

Cuando se usan otros sistemas (tales como viscosímetros de taza cerrada), se debería tener cuidado durante todos los pasos del procedimiento de prueba para asegurarse que los resultados experimentales no son parciales, debido al asentamiento de partículas de cemento. El fenómeno puede aún ocurrir en los cilindros del consistómetro, donde las lechadas de cemento son condicionadas antes de medir sus propiedades reológicas. Por lo tanto, la lechada de prueba debería ser cuidadosamente homogeneizada antes de tomar una muestra para la prueba reológica. Además, se deberá verificar que los torques medidos a una velocidad rotacional dada son estables. Si decrecen continuamente, es probable que la sedimentación de partícula ocurra (aunque algunas veces puede ser difícil de diferenciar de la tixotropía). El torque medido puede primero disminuir y después aumentar, porque un banco de partículas de cemento se acumula en el fondo de la taza que entra en el espacio anular. Esto explica el por qué en el caso de las geometrías de taza cerrada deberían ser usadas con cuidado para caracterizar reológicamente las lechadas de cemento.

Centrifugación.

Una vez centrifugado a altas velocidades rotacionales, las partículas parecen emigrar en el espacio anular y afectar irreversiblemente las lecturas tomadas a bajas velocidades. Este problema puede ser resuelto suprimiendo el volumen muerto de fluido abajo del cilindro interior, esto es, posicionando la taza al nivel más bajo que el nivel normal. Desafortunadamente, esta solución no es universal porque puede crear algunos problemas con las formulaciones de cemento que presentan una tendencia de asentamiento. No todas las lechadas de cemento muestran tal comportamiento y la mejor forma de detectarlo es correr a una velocidad de ciclo histéresis. Cuando las lecturas del ciclo de regreso son mucho más altas que las lecturas del ciclo de ida, puede sospecharse que la centrifugación ha afectado los resultados. Las lecturas bajas deberían preferirse para caracterizar las propiedades del fluido de prueba.

4.2.2. Aspectos generales.

La determinación del comportamiento reológico de las lechadas de

cemento¹⁶ es esencial para la evaluación apropiada de los gastos y presiones de desplazamiento, para optimizar la colocación del cemento. Varias lechadas de cemento han sido examinadas, usando equipo de flujo en tubería y viscosímetros de cilindros coaxiales, en un esfuerzo para determinar cuál método es más conveniente para determinar tales características de flujo.

Estudios usando un reómetro de flujo en tubería, indican que ocurre un “resbalamiento” aparente en la superficie del tubo durante la evaluación reológica de las lechadas de cemento. Dicho fenómeno se atribuye a la migración de partícula que se presenta cuando las lechadas son evaluadas reológicamente.

En la industria petrolera ¹⁷, la práctica actual para la caracterización reológica de los fluidos está basada en la viscosimetría rotacional. La Especificación API RP 10 B recomienda el uso de un viscosímetro de cilindros coaxiales, aunado con un procedimiento muy preciso de prueba de lechadas y efectivamente esta técnica proporciona buenos resultados.

De acuerdo al API ³ la temperatura máxima de prueba para las determinaciones reológicas es de 82 °C. Esto resulta inadecuado de acuerdo a las condiciones actuales de los pozos, que exceden de 82 °C. En general, las propiedades reológicas, Viscosidad plástica (Vp) y el Punto de cedencia (Pc) de las lechadas de cemento decrecen con un incremento de temperatura. Sin embargo, más allá de cierta temperatura, no necesariamente 82 °C, estas propiedades pueden alcanzar un valor constante.

El objetivo principal de un trabajo de cementación es desplazar el fluido del pozo y obtener una buena adhesión entre la TR y la formación. La eficiencia del desplazamiento se incrementa con un incremento en la velocidad de bombeo de la lechada; sin embargo, hay un riesgo de fracturar las formaciones a gastos más altos. De aquí que la lechada siempre deba ser bombeada a gastos con una densidad equivalente de circulación (DEC) que no fracture las formaciones. Como la lechada es bombeada hacia la TR y sube por el espacio anular, se experimenta una pérdida de presión por fricción. Esta caída de presión debe ser superada por la unidad de bombeo en la superficie. Si las propiedades reológicas son sobrestimadas, las presiones de fricción y por tanto las presiones

de circulación calculadas serán sobrestimadas para un cierto gasto. Basado en estos cálculos, el gasto programado será bajoestimado. Mientras que si la V_p y el P_c son conocidos como una función de temperatura, entonces la lechada de cemento se podría haber bombeado a un gasto más alto y mejorar la eficiencia de desplazamiento sin causar ninguna ruptura de la formación.

En el otro extremo, si las propiedades reológicas son bajoestimadas a elevadas temperaturas, entonces el gasto programado estará sobrestimado. Por lo tanto cualquier correlación, al extrapolarse a temperaturas elevadas deberá cuidarse de no bajoestimar dichas propiedades.

Kellingray y colaboradores¹ reportaron la reología en lechadas de cemento a 119 °C y 11900 psi (838 kg/cm²). De su estudio se concluyó que comparado con el efecto de la temperatura en la reología, el efecto de la presión puede despreciarse. También concluyeron que la velocidad de desplazamiento puede ser incrementada usando la información de la reología a alta temperatura.

Shah y Sutton¹⁸ encontraron una relación entre la información obtenida a través de viscosímetros de cilindros coaxiales (Equipo Fann 35) y un circuito de flujo en tubería. Los autores calcularon V_p y P_c para ambos juegos de datos. La relación entre ambas viscosidades plásticas pudo describirse adecuadamente por una línea recta en una gráfica logarítmica. En general, todas las V_p obtenidas con viscosímetros son ligeramente más altas que las obtenidas en el circuito. Las viscosidades plásticas coinciden con la línea recta, con una desviación promedio de 11.4%. La ecuación correspondiente resultó ser:

$$\ln (V_p)_p = 0.9815 \ln (V_p)_F - 0.03832$$

Los esfuerzos de cedencia evaluados en ambos sistemas se correlacionan con la ec. siguiente

$$(P_c)_p = 1.591 (P_c)_F - 2.149$$

donde P_c esta dado en lb_f/100 pies², además p representa el circuito de flujo en tubería y F se refiere al viscosímetro Fann.

En general, los valores de $(P_c)_F$ son más bajos que los valores de $(P_c)_p$. De este modo, usando la característica de flujo y las ecs. descritas, podemos obtener propiedades reológicas confiables de las lechadas de cemento y

correlacionarlas con propiedades similares obtenidas en el circuito flujo en tubería. Estas correlaciones pueden usarse para convertir $(Vp)_F$ y $(Pc)_F$ determinados de los datos de viscosímetros para obtener $(Vp)_P$ y $(Pc)_P$ para el equipo flujo en tubería.

Debido a la complejidad que representa el estudio del comportamiento de las lechadas a base de cemento, es necesario establecer un marco operacional en el cual se desarrollará el presente estudio. Sobre la base de lo anterior, las pruebas experimentales se contemplan de la manera siguiente:

1.- La densidad que representa comúnmente riesgos de pérdidas de circulación en las operaciones de cementación en los campos del Distrito Poza Rica es la correspondiente a 1.95 gr/cm^3 .

2.- Se utilizarán básicamente tres aditivos para la preparación de las lechadas a estudiarse, a saber: controlador de pérdida de fluido y dispersante, que representan impacto sobre las propiedades reológicas de la mezcla y adicionalmente, se utilizará un agente antiespumante. A continuación se detallan sus características.

Aditivos para control de pérdida de fluido.

Los aditivos para el control de pérdida de fluido se usan en el cemento para mantener el agua de mezcla de las lechadas de cemento cuando son colocadas en formaciones porosas y se sujetan a altas presiones y temperaturas. Algunos beneficios adicionales son los de mantener la lechada de cemento homogénea y las propiedades de flujo deseadas; minimizar el daño a la formación causado por el filtrado del cemento; asegurar uniformidad de la columna de la lechada de cemento en el espacio anular y alto rendimiento en cementaciones forzadas y remediales.

Dispersantes.

También llamados reductores de fricción ó inductores de turbulencia. Se agregan a las lechadas de cemento para facilitar la mezcla en densidades mayores a las recomendadas por el API, para tipos de cemento que no necesitan exceso de agua. Dentro de sus características y beneficios se tienen: reducir la presión de fricción; alcanzar flujo turbulento a gasto reducido; aplicación en

lechadas reducidas de agua; reforzar los aditivos para pérdida de fluidos; aumentar la respuesta en los retardadores y mejorar las propiedades reológicas, así como el esfuerzo compresivo del cemento.

Antiespumantes.

Las lechadas de cemento tienen tendencia a formar espuma durante la preparación de la mezcla o entradas de aire. Esto dificulta obtener la densidad deseada en la lechada de cemento a menos que se utilicen agentes antiespumantes en las operaciones de cementación.

4.2.3. Desarrollo experimental.

4.2.3.1. Reacción exotérmica del cemento al contacto con el agua.

Equipo y material utilizado.⁴

Balanza analítica. Esta debe tener la capacidad de pesar de 0.01 gr hasta 1000 gr, ya que se pesarán cantidades mínimas de aditivo y cantidades de cemento de 800 gr. Se debe encontrar calibrada y en un lugar libre de corrientes de aire y movimientos bruscos que afecten la pesada. Se debe contar también con el material adecuado para pesar, como lo es un recipiente capaz de contener hasta 1 kg de cemento y bolsas de plástico con la misma capacidad, cucharas para adicionar cemento, probeta, pipetas y perilla para pesar agua, así como papel para pesado de aditivos y espátulas para estos.

Mezcladora de dos velocidades. Consiste en una mezcladora tipo propela con vaso metálico donde se realizará la preparación de la lechada. Tiene una velocidad baja de 4 000 rpm y una alta de 12 000 rpm que deberá encontrarse en condiciones operables, limpia, seca y deberá de tener una tapa que impida la salida de la mezcla.

Balanza para lodos. La balanza previamente calibrada debe encontrarse seca y limpia para poder medir la densidad de la lechada que se preparará.

Termómetro. Con capacidad máxima hasta de 150 °C.

Reloj. El reloj (timer) debe ser verificado cada seis meses para su exactitud. Estos deben tener una exactitud de +/- 30 seg/hr.

Cemento empleado: Apasco tipo "H", molienda 285 P.

Agua utilizada. El agua empleada en las pruebas es la misma que comúnmente se utiliza en las operaciones de cementación y el análisis de la misma se detalla a continuación:

Densidad : 1.0 gr/cm³

PH : 7

Salinidad : 500 ppm

Dureza : 1.5 ppm

Carbonatos : 900 ppm

Aditivos. Se seleccionaron aditivos de una compañía cuyos aditivos son los de mayor uso actualmente en el Distrito Poza Rica. Las funciones y beneficios con el empleo de los mismos ya fueron descritos con antelación. Los nombres comerciales de éstos son: FL12 (aditivo controlador de filtrado) el cual es un polvo, mezcla selecta de polímeros para aplicaciones de bajas a moderadas temperaturas y no actúa como retardador; FR3P (dispersante) que también es un polvo efectivo en lechadas de agua dulce o bajas en sal y aplicación a 400 °F y finalmente el AFP, polvo agente antiespumante, efectivo en todas las temperaturas con dosificación óptima de 0.1 a 0.4%.

Formulación de las lechadas.

Lechada (A)

Densidad : 1.97 gr/cm³

Cemento : 800 gr

Agua : 327 ml

Lechada (B)

Densidad : 1.97 gr/cm³ con aditivos.

Cemento : 800 gr

Agua : 302.75 ml

Antiespumante AFP : 0.30% (2.4 gr)

Control de filtrado FL12 : 0.35% (2.8 gr)

Dispersante FR3P : 0.20% (1.6 gr)

Lechada (C)

Densidad : 1.85 gr/cm³

Cemento : 800 gr

Agua : 386.09 ml

Procedimiento.

El procedimiento empleado está basado en la sección 5 de la Especificación API RP 10B²⁰. La cantidad de aditivo se determina multiplicando el porcentaje de cada aditivo por la cantidad de cemento a utilizar para la prueba dividido por cien.

Pesado.

Se pesan individualmente las cantidades de cemento y aditivos empleados en una balanza analítica, cuidando de tarar ésta antes de pesar cada aditivo. Se debe prever que no existan corrientes de aire que impidan pesar correctamente. Finalmente se pesa el agua en una probeta, quitando los excedentes con una pipeta.

Mezclado.

1.- Se coloca el agua en el vaso de la mezcladora y se tapa, se enciende el motor en la velocidad baja (4000 rpm), adicionando los aditivos en el siguiente orden:

- a) Antiespumante.
- b) Dispersante.
- c) Controlador de filtrado.

2.- Se adiciona el cemento lentamente pero constantemente para evitar grumos, en un tiempo de 60 segundos a velocidad baja.

3.- Se acciona la segunda velocidad, alta (12000 rpm), por 35 segundos más.

4.- Se verifica el peso de la lechada sólo para el caso de la primera preparación de cada prueba (en una balanza para lodos). Una vez medida la densidad, se devuelve la lechada al vaso de la mezcladora y se acciona nuevamente durante 10 segundos a alta velocidad.

Desarrollo de la prueba.

Estas primeras lechadas preparadas se identificaron como A, B y C cuyas formulaciones ya fueron descritas con anterioridad. Una vez preparadas se mantuvo en agitación con la mezcladora mientras se iba registrando el incremento de temperatura experimentado por la muestra, producto de la reacción exotérmica del cemento con el agua y cuyo proceso es el objetivo de esta primera prueba.

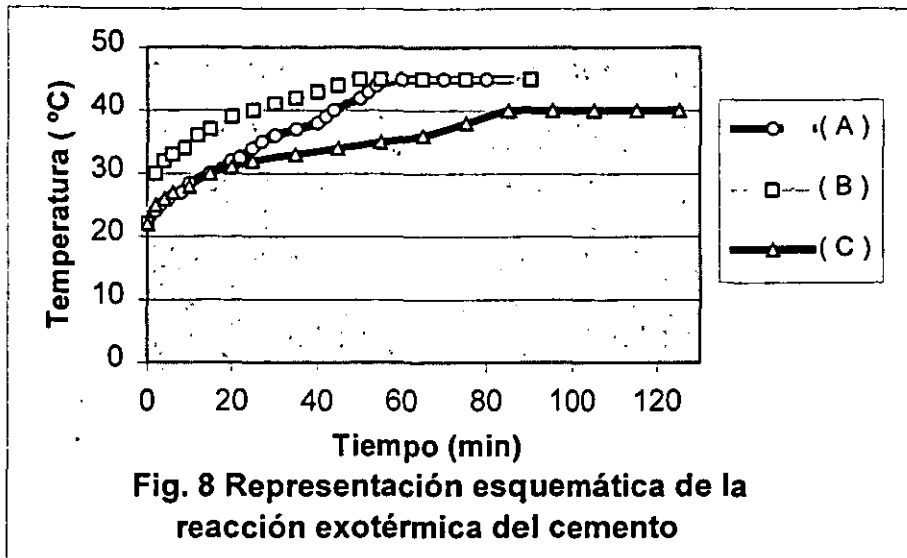
Resultados.

En la Fig. 8 se observa el incremento continuo de la temperatura en las tres lechadas. Es notable ver que invariablemente se llega a una temperatura estable (45°C), que en el caso de la lechada de menor densidad llegó a ser menor (40°C) por su mayor contenido de agua. Con respecto a la lechada de 1.97 gr/cm³, puede observarse que los aditivos actuaron como catalizadores, ya que la temperatura de estabilidad se alcanzó antes de lo que lo había hecho la lechada con cemento puro.

Se seleccionaron las temperaturas a las cuáles se realizarían pruebas reológicas para conocer su comportamiento durante la cinética química de la reacción; en la Tabla 1 están resaltadas los puntos de tiempo y temperatura seleccionados para hacer las mediciones.

Tabla 1. Comportamiento de la reacción exotérmica del cemento.

(A) Lechada cemento puro (1.97 gr/cm ³)		(B) Lechada con aditivos (1.97 gr/cm ³)		(C) Lechada cemento puro (1.85 gr/cm ³)	
Tiempo (min)	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Temp. (°C)
0	22	0	22	0	22
2	24	2	30	2	25
3	25	4	32	4	26
5	26	6	33	6	27
8	27	9	34	10	28
10	28.5	12	36	15	30
15	30	15	37	20	31
20	32	20	39	25	32
22	32.5	25	40	35	33
25	34	30	41	45	34
27	35	35	42	55	35
30	36	40	43	65	36
35	37	45	44	75	38
40	38	50	45	85	40
42	39	55	45	95	40
44	40	65	45	105	40
50	42	75	45	115	40
52	43	90	45	125	40
54	44				
60	45				
65	45				
70	45				
75	45				
80	45				
90	45				



4.2.3.2. Determinación de las propiedades reológicas de lechadas a diferentes temperaturas.

Equipo y material utilizado.

Balanza analítica. Descrita.

Mezcladora de dos velocidades. Descrita.

Reloj. Descrito.

Balanza para lodos. Descrita.

Chaqueta de calentamiento. Consiste de un depósito metálico dentro del cual se introduce un vaso de acero en el cual va contenida la lechada. El depósito tiene en su parte exterior una perilla la cual controla la temperatura a la que se desea mantener la lechada. Tiene un rango máximo de temperatura de 160 °C.

Viscosímetro rotacional. Es un equipo capaz de medir esfuerzos de corte contra velocidad de corte en un intervalo cercano a cero hasta 1022 seg^{-1} y de lectura directa con potencia proporcionada por un motor con caja de reducción de velocidades. La lechada se deposita en un vaso de acero y un cilindro exterior o rotor que se mueve a una velocidad rotacional constante para cada lectura de

rpm. La rotación del cilindro exterior dentro de la lechada produce un momento en el cilindro interior ó péndulo. Un resorte de torsión restringe el movimiento. Una escala adherida al péndulo indica el desplazamiento de éste.

El viscosímetro utilizado para el desarrollo del presente trabajo es de 12 velocidades fijas a saber: 1, 2, 3, 6, 10, 20, 30, 60, 100, 200, 300 y 600 rpm. La marca del mismo es EG&G Chandler Engineering (Chan 35 API).

Cemento empleado. Descrito.

Agua utilizada. Descrita.

Aditivos. Descritos.

Formulación de las lechadas.

Corresponden a las descritas con antelación para las lechadas A, B y C de la primera prueba realizada.

Procedimiento.

El proceso del pesado del cemento; agua y aditivos continúa siendo el mismo incluso el mezclado de los mismos.

Desarrollo de la prueba.

De acuerdo a la Tabla 1, se hicieron las mediciones reológicas para las tres lechadas descritas justo en el tiempo transcurrido después de su preparación y señalado en la columna del tiempo. Obviamente, se corroboró que la temperatura correspondiera a la señalada en la misma Tabla.

Resultados.

Los resultados de las diferentes mediciones reológicas se presentan en las Tablas 2, 3 y 4. En ellas se registraron los valores de esfuerzo de corte en $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$ correspondientes a todas las velocidades de corte del viscosímetro rotacional, para las distintas temperaturas seleccionadas de acuerdo a la Tabla 1.

Tabla 2. Propiedades reológicas de la lechada (A), esfuerzo de corte en lb / 100 pies² como una función de la velocidad de corte (rpm) y de la temperatura (° C)

RPM/TEMP	24°C	30°C	35°C	40°C	45°C	45°C
1	8	5	9	11	11	14
2	9	7	9	14	11	14
3	13	9	11	17	18	14
6	14	13	18	31	40	50
10	17	17	31	42	57	70
20	18	24	44	55	60	85
30	22	27	50	57	69	83
60	26	37	55	66	74	93
100	33	43	59	75	79	114
200	44	53	69	84	86	140
300	55	64	74	89	94	149
600	140	97	88	100	112	171

Tabla 3. Propiedades reológicas de la lechada (B), esfuerzo de corte en lb / 100 pies² como una función de la velocidad de corte (rpm) y de la temperatura (° C)

RPM/TEMP	30°C	35°C	40°C	45°C	45°C
1	4	8	12	16	18
2	5	9	15	21	21
3	6	11	19	23	31
6	10	13	19	23	38
10	14	16	19	23	38
20	26	25	21	24	38
30	37	31	24	25	40
60	65	49	38	40	48
100	93	72	56	62	68
200	157	119	90	99	105
300	202	159	127	133	144
600	350	279	199	198	204

Tabla 4. Propiedades reológicas de la lechada (C). esfuerzo de corte en lb / 100 pies² como una función de la velocidad de corte (rpm) y de la temperatura (° C)

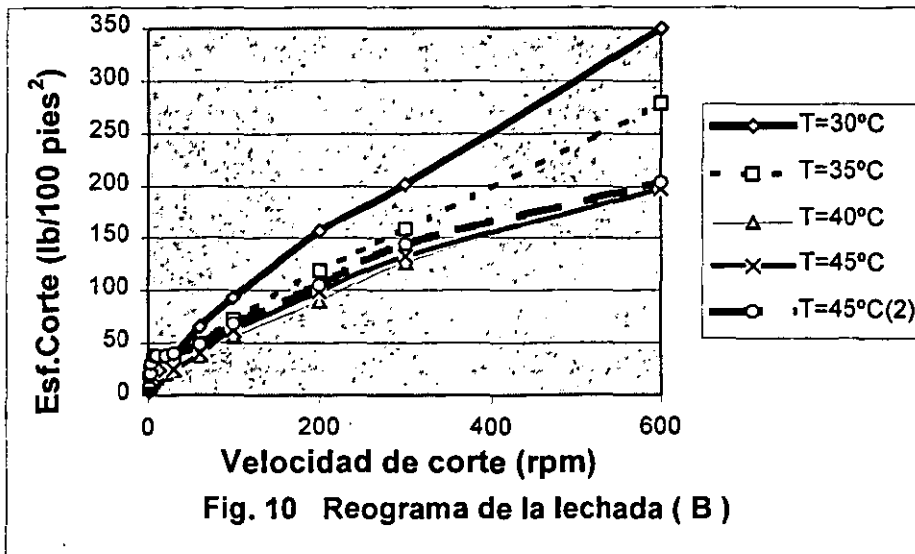
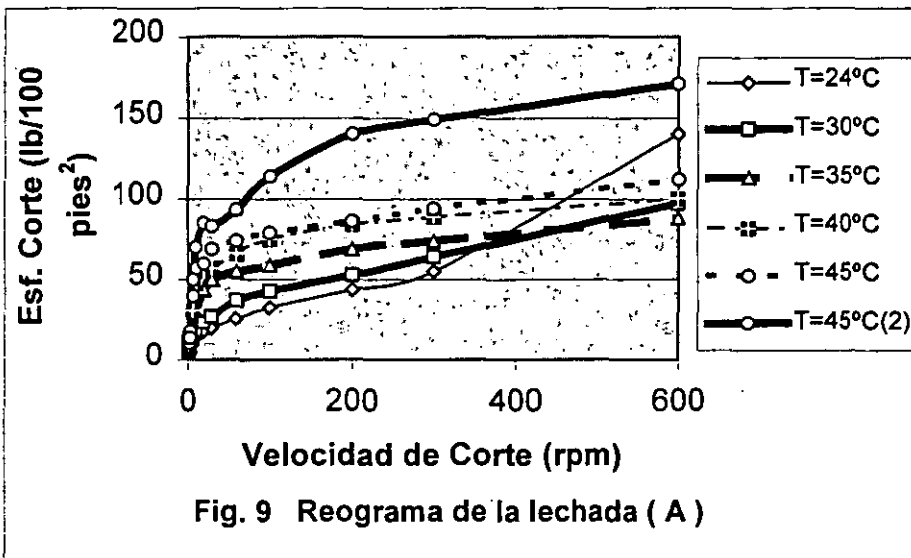
RPM/TEMP	30°C	35°C	40°C	45°C	45°C
1	3	3	8	10	8
2	4	4	8	12	8
3	4	6	9	18	8
6	4	8	24	25	25
10	4	8	22	20	25
20	4	9	23	20	25
30	4	9	25	21	27
60	5	12	30	26	28
100	7	14	35	29	33
200	14	23	42	33	38
300	23	29	48	40	43
600	73	53	64	53	53

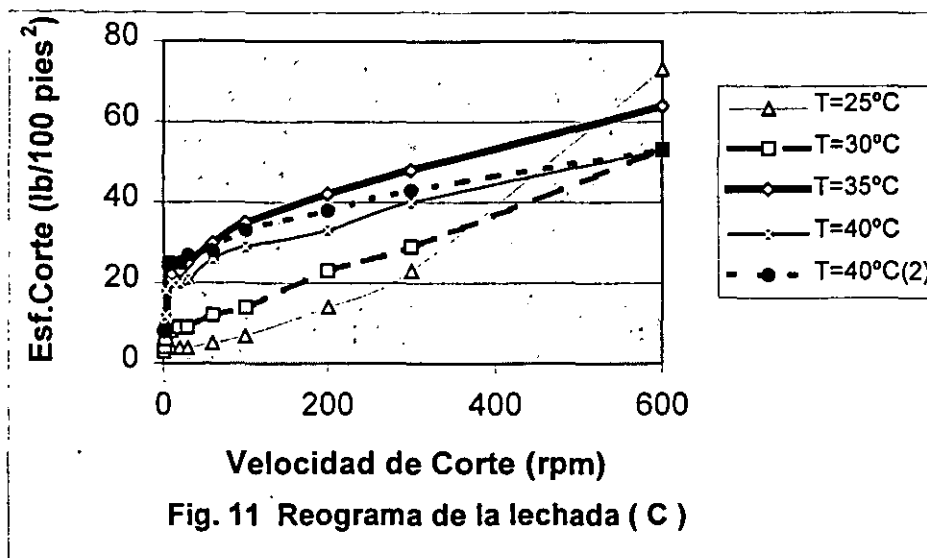
Análisis de las gráficas obtenidas .

La Fig. 9 representa el reograma de la muestra de 1.97 gr/ cm³ de cemento puro (lechada A). Para lecturas bajas se presenta un comportamiento un tanto incierto ya que dentro del proceso de mezclado se presentan dos fenómenos encontrados entre la temperatura que se va incrementando y que debería disminuir la viscosidad y el correspondiente al incremento de la viscosidad que experimenta por sí mismo el mezclado. Dentro de la región comprendida entre 30 y 300 rpm se aprecia una uniformidad de lecturas, esto es, las lecturas disminuyen paulatinamente por el efecto del incremento de temperatura de la muestra. Es de observarse que en las lecturas tomadas a 600 rpm, el esfuerzo de corte medido no siempre disminuye al incrementarse la temperatura, esto es, presentan un comportamiento errático.

Para el caso de la Fig. 10 el comportamiento es similar al descrito anteriormente, ya que puede verse claramente como para una temperatura de 45°C y después de las 300 rpm su comportamiento se distorsiona notablemente.

En la Fig. 11, sucede exactamente lo mismo con la lechada a 40°C. La diferencia estriba en que precisamente en esta lechada fue observado un ligero asentamiento de la lechada al finalizar la toma de lecturas en el vaso del viscosímetro. Esto se discutió previamente en la Sección 4.2.1. como un problema característico durante el proceso de las mediciones.





El desarrollo de las pruebas antes mencionadas fue importante, ya que en general se hicieron las siguientes observaciones y que serán el punto de partida para las mediciones futuras durante el desarrollo del presente trabajo.

1.- Las lecturas serán válidas solamente en lechadas que no muestren un comportamiento de sedimentación, ya que esto puede enmascarar una mala reología. Para tal efecto es recomendable efectuar mediciones en ciclo de histéresis para descartar tal posibilidad.

2.- En cuanto al rango de lecturas de velocidades de corte, se establece que el rango más apropiado para las mediciones se encuentra entre 20 y 300 rpm, ya que claramente puede notarse que para lecturas arriba de 300 rpm el comportamiento de las lechadas es completamente errático y a la fecha no se ha determinado la razón que explique tal comportamiento. Además, para lecturas debajo de 30 rpm, es notable el efecto de deslizamiento en la pared. Finalmente, puede decirse que en general, las lechadas de cemento nunca estarán expuestas a velocidades de corte ni menores de 20 rpm ni mayores de 300 rpm en una operación de cementación.

3.- El rango de temperatura para las pruebas será hasta de 80°C. En general para los campos del Distrito Poza Rica se tiene una temperatura máxima

de fondo de 80°C, con excepción del Campo San Andrés donde se tienen temperaturas hasta de 120°C.

4.- Las pruebas se realizarán a diferentes temperaturas a saber: 50°C, 60°C, 70°C y 80°C.

4.2.3.3. Determinación de las propiedades reológicas a diferentes temperaturas de lechadas comúnmente usadas en campos del Distrito Poza Rica de la División Norte de PEP.

Equipo y material utilizado.

Balanza analítica. Descrita.

Mezcladora de dos velocidades. Descrita.

Reloj. Descrito.

Consistómetro de presión atmosférica. El equipo consiste de una celda cilíndrica rotatoria para la lechada, equipada con un ensamble de propela estacionaria, dentro de un baño de temperatura controlada. La celda de la lechada es rotada a una velocidad de 150 +/- 15 rpm (2.5 +/- 0.25 rev/seg). La propela y todas las partes de la celda expuestas a la lechada deben ser de materiales resistentes a la corrosión. El sensor y controlador de temperatura deben ser calibrados a una exactitud de +/- 1.7 °C (+/- 3 °F). La calibración debe ser con frecuencia mensual y debe ser realizado de acuerdo al procedimiento descrito en el Apéndice A de la Especificación 10A.

Balanza para lodos. Descrita.

Chaqueta de calentamiento. Descrita.

Viscosímetro rotacional. Descrito.

Cemento empleado. Apasco tipo "H". Por cuestión de existencia se manejaron tres diferentes moliendas de cemento a saber: 285P, 356P y 62P; el número indica el día del año en que se fabricó el cemento y la letra P indica que es para uso en pozos petroleros. Originalmente las pruebas con las lechadas 1A, 2A, y 3A se realizaron con una molienda 285P, seguidamente de la lechada 1 a la 5 se manejó 356P para finalmente trabajarse con una molienda 62P de las

mezclas 6 a la 20. Se hace notar que la constitución de las lechadas 1A, 2A, y 3A es la misma que las correspondientes a la 1, 2 y 3, la única diferencia estriba en la molienda.

Agua utilizada. Descrita.

Aditivos. Descritos.

Formulación de las lechadas.

La Tabla 5 detalla la formulación de las lechadas utilizadas en las pruebas, considerando todas las combinaciones posibles en las operaciones de cementación.

Como puede apreciarse en la Tabla 5, se manejaron dos variables que influyen directamente en la reología de la lechada, esto es, el aditivo para el control de filtrado (FL-12) y el dispersante (FR-3P). La cantidad de antiespumante se mantuvo constante ya que controló perfectamente el contenido de espuma en la mezcla. Cabe mencionar que el peso de cemento empleado siempre fue el mismo y variando únicamente la cantidad de agua para mantener una densidad de lechada constante e igual a 1.95 gr/cm^3 . La razón de emplear esta densidad obedece al hecho de que normalmente en la cementación de la TR de 7 5/8" en la formación Paleoceno Chicontepec Canal, se presentan pérdidas de circulación, precisamente con esta lechada.

Tabla 5. Formulación de las lechadas a utilizar en las pruebas.

# Lech	Densidad (gr/cm ³)	Control Filtrado FL-12 (%)	Dispersante FR-3P (%)	Antiespumante AFP (%)	Cemento (gr)	Agua (ml)
1	1.95	0.25	0.15	0.30	800	315.29
2		0.30	"	"	"	315.00
3		0.35	"	"	"	314.71
4		0.40	"	"	"	314.42
5		0.45	"	"	"	314.12
6	1.95	0.25	0.20	0.30	800	315.19
7		0.30	"	"	"	314.90
8		0.35	"	"	"	314.61
9		0.40	"	"	"	314.31
10		0.45	"	"	"	314.02
11	1.95	0.25	0.25	0.30	800	315.09
12		0.30	"	"	"	314.80
13		0.35	"	"	"	314.50
14		0.40	"	"	"	314.21
15		0.45	"	"	"	313.92
16	1.95	0.25	0.30	0.30	800	314.99
17		0.30	"	"	"	314.70
18		0.35	"	"	"	314.40
19		0.40	"	"	"	314.11
20		0.45	"	"	"	313.82

Procedimiento.

El proceso del pesado del cemento, agua y aditivos continúa siendo el mismo incluso el mezclado de ellos.

Desarrollo de la prueba.

Una vez preparada la lechada y verificada su densidad se sigue con los pasos que a continuación se enumeran.

1.- La lechada se vacía rápidamente en la celda hasta el nivel indicado, el cuál está marcado por una muesca circular en su interior. La propela, colocada previamente, debe insertarse en la tapa, de tal forma que la ranura de la

parte superior de la flecha enganche en el perno del brazo de momentos localizado en el interior de la tapa

2.- Todo el ensamble debe colocarse en el baño de aceite del consistómetro atmosférico, de tal forma que los pernos que aseguran la tapa con la celda también entren en las ranuras del cilindro giratorio.

3.- Realizado lo anterior se acciona el motor del consistómetro y de manera simultánea el tomador de tiempo. El intervalo de tiempo entre la terminación del mezclado de la lechada y el arranque del equipo no debe exceder de 1 minuto.

4.- Se verifica la consistencia inicial de la lechada en el indicador del potenciómetro.

5.- Transcurridos 20 minutos (1200 segundos) se verifica consistencia final, se apaga el motor y el tomador de tiempo, procediéndose a vaciar la lechada al vaso del viscosímetro.

Medición.

El vaso del viscosímetro previamente se introduce en una chaqueta térmica que es ajustada a la temperatura a la que se va a realizar la medición. El conjunto es colocado en el viscosímetro y encendiéndose a una velocidad de 30 rpm, durante 60 segundos y se toma la lectura finalizado este tiempo. Lo mismo se hace para las velocidades de 60, 100, 200 y 300 rpm.

Tanto la celda del consistómetro como el vaso del viscosímetro deben de revisarse después de utilizarse para descartar posibles efectos de sedimentación. Por otro lado, se señala que para cada temperatura de prueba se preparó en cada caso la lechada cada vez que se realizaba una medición, esto es, para el total de mediciones (50, 60, 70 y 80°C) se prepararon cuatro lechadas de igual formulación.

Para la obtención de las gráficas se consideraron los valores de esfuerzo cortante en $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$ y la velocidad de corte en seg^{-1} . Los valores obtenidos del viscosímetro y las rpm se convirtieron con los factores descritos con anterioridad.

Resultados.**Lechadas 1 A - 3 A.**

Los primeros resultados se encuentran tabulados en las Tablas 6, 7 y 8 que corresponden precisamente a las lechadas denominadas 1 A, 2 A y 3 A en donde entre otros parámetros se describe la formulación de la lechada. La velocidad de corte es expresada en seg^{-1} y el esfuerzo de corte correspondiente en $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$. Las gráficas correspondientes para estas lechadas se muestran en las figuras 12, 13 y 14.

Figuras 12-14.

En este caso se utilizó una molienda 285P y sólo se realizaron pruebas en tres lechadas ya que dicha molienda se agotó. Aquí se observa que conforme se incrementa el porcentaje de FL-12 se elevan los valores de esfuerzo cortante para una misma temperatura, de un mínimo de 29.88 a un máximo de 37.35 $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$ a una velocidad de corte de 51 seg^{-1} y una temperatura de 50°C.

Por otro lado, dicho esfuerzo va disminuyendo en función de la temperatura. Es notable que para la primera lechada se observa una diferencia entre valores de esfuerzo cortante casi constante, en tanto que para las otras dos lechadas la diferencia se va incrementando conforme se aumenta la velocidad de corte. Lo anterior en función que la cantidad de dispersante se mantiene constante y sólo crece el contenido de controlador de filtrado en la mezcla.

Puede concluirse que la diferencia de las curvas obedece a la variación de las tres variables que modifican la reología de la lechada, esto es, controlador de filtrado, dispersante y temperatura.

Tabla 6. Propiedades reológicas de la lechada # 1 A -esfuerzo de corte.

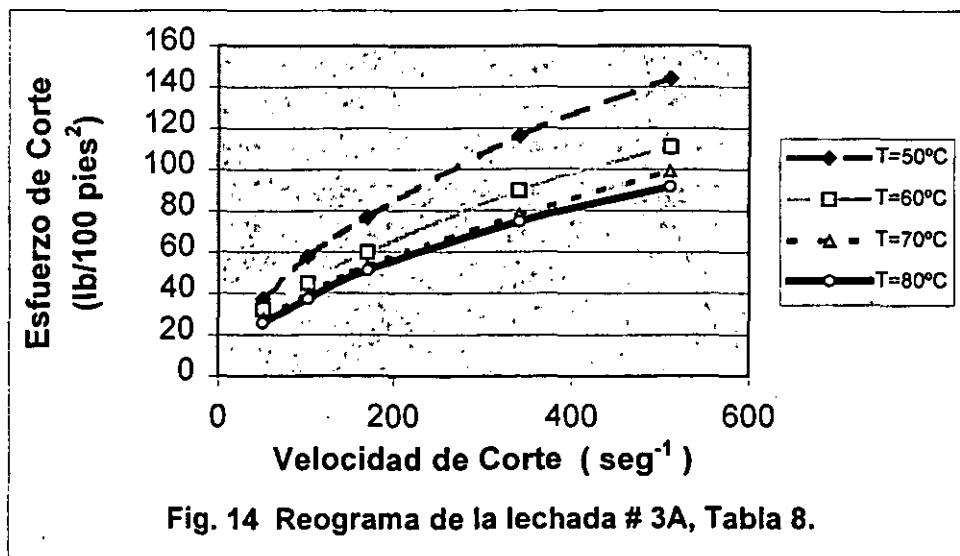
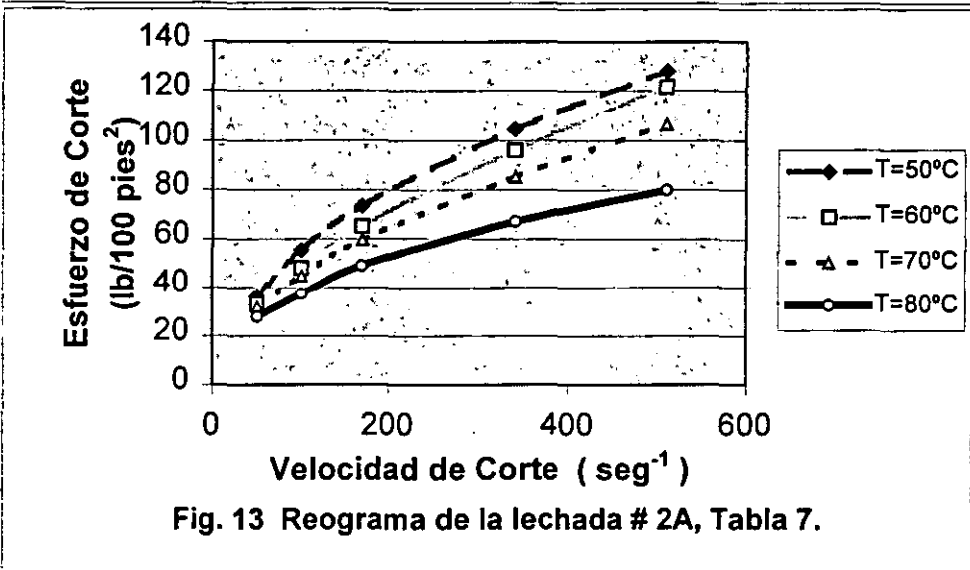
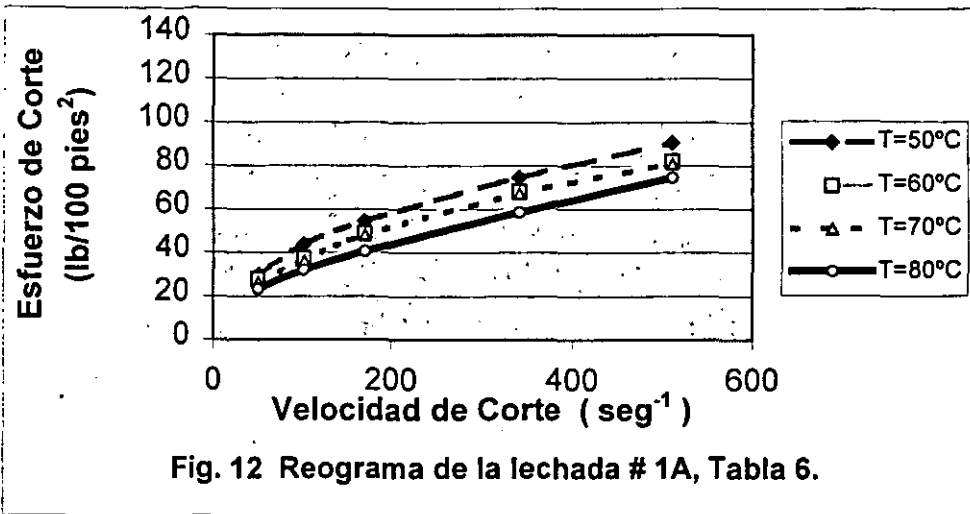
LECHADA# 1A	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 285P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.0 gr	51	29.88	27.74	26.68	23.47
FR 3P 1.2 gr	102	43.75	37.35	36.28	32.01
AFP 2.4 gr	170	54.42	49.08	48.02	40.55
Cemento 800 gr	341	74.69	68.29	67.22	58.69
Agua 315.29 gr	511	90.70	82.16	81.09	74.69

Tabla 7. Propiedades reológicas de la lechada # 2 A – esfuerzo de corte.

LECHADA# 2A	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 285P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.4gr	51	36.28	33.08	32.01	27.74
FR 3P 1.2 gr	102	55.48	48.02	44.81	37.35
AFP 2.4 gr	170	73.62	65.09	59.75	49.08
Cemento 800 gr	341	104.57	96.03	85.36	67.22
Agua 315.00 gr	511	128.04	121.64	106.70	80.03

Tabla 8. Propiedades reológicas de la lechada # 3 A – esfuerzo de corte.

LECHADA# 3A	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 285P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.8gr	51	37.35	32.01	27.74	25.61
FR 3P 1.2 gr	102	57.62	44.81	39.48	37.35
AFP 2.4 gr	170	76.82	59.75	53.35	51.22
Cemento 800 gr	341	116.30	89.63	77.89	74.69
Agua 314.71 gr	511	144.05	110.97	99.23	91.76



Lechadas 1- 5.

En la preparación de estas lechadas se utilizó una molienda 356P y aunque las lecturas obtenidas no coincidieron exactamente con las lechadas 1 A, 2 A y 3 A - siendo de la misma formulación- la tendencia de incremento y decremento de los esfuerzos con las velocidades de corte y temperatura respectivamente siguen el mismo patrón. Los resultados se muestran en las Tablas 9, 10, 11, 12 y 13.

Tabla 9. Propiedades reológicas de la lechada # 1 – esfuerzo de corte.

LECHADA #1	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 356P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.0gr	51	26.68	25.61	24.54	23.47
FR 3P 1.2 gr	102	35.21	34.14	33.08	32.01
AFP 2.4 gr	170	46.95	43.75	41.61	40.55
Cemento 800 gr	341	69.36	64.02	60.82	58.69
Agua 315.29 gr	511	85.36	80.03	77.89	74.69

Tabla 10. Propiedades reológicas de la lechada # 2 – esfuerzo de corte.

LECHADA #2	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 356P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.4gr	51	32.01	30.94	28.81	24.54
FR 3P 1.2 gr	102	46.95	42.68	37.35	33.08
AFP 2.4 gr	170	64.02	55.48	48.02	41.61
Cemento 800 gr	341	99.23	82.16	72.56	58.69
Agua 315.00 gr	511	125.91	104.57	90.70	71.49

Tabla 11. Propiedades reológicas de la lechada # 3 – esfuerzo de corte.

LECHADA #3	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 356P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.8gr	51	34.14	33.08	32.01	30.94
FR 3P 1.2 gr	102	48.02	44.81	41.61	40.55
AFP 2.4 gr	170	65.09	58.69	53.35	51.22
Cemento 800 gr	341	101.37	89.63	78.96	74.69
Agua 314.71 gr	511	132.31	113.10	99.23	91.76

Tabla 12. Propiedades reológicas de la lechada # 4 – esfuerzo de corte.

LECHADA #4	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 356P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 3.2gr	51	37.35	36.28	30.94	26.68
FR 3P 1.2 gr	102	55.48	54.42	42.68	38.41
AFP 2.4 gr	170	74.69	72.56	54.42	50.15
Cemento 800 gr	341	113.10	109.90	76.82	72.56
Agua 314.42 gr	511	138.71	134.44	94.96	90.70

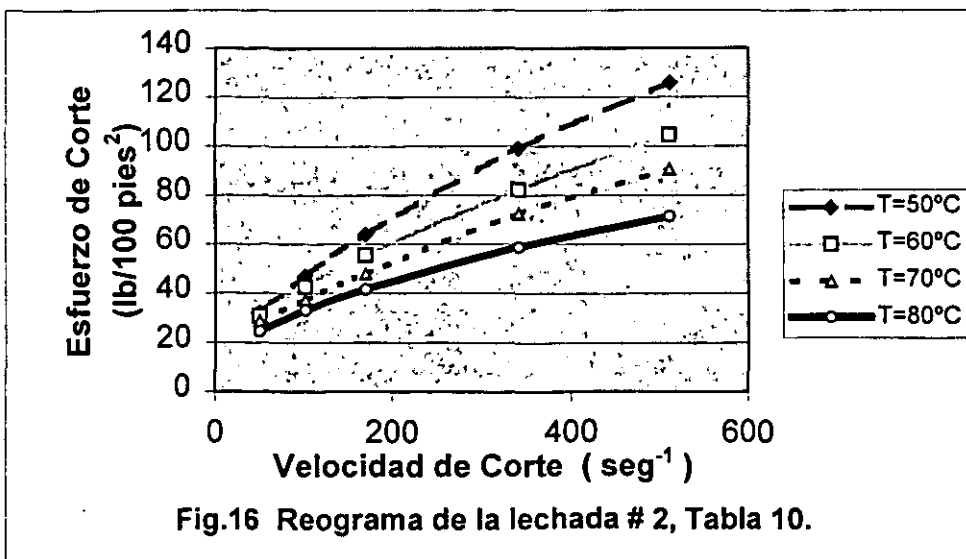
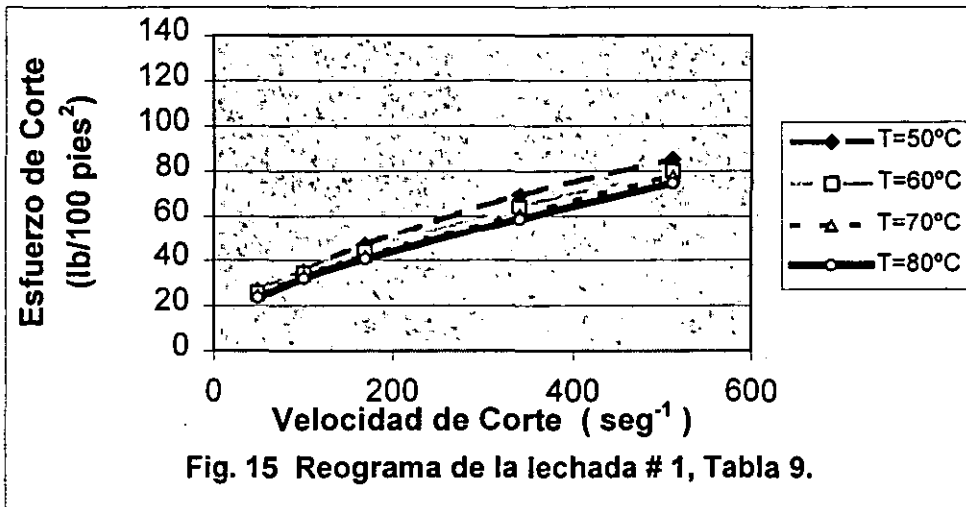
Tabla 13. Propiedades reológicas de la lechada # 5 – esfuerzo de corte.

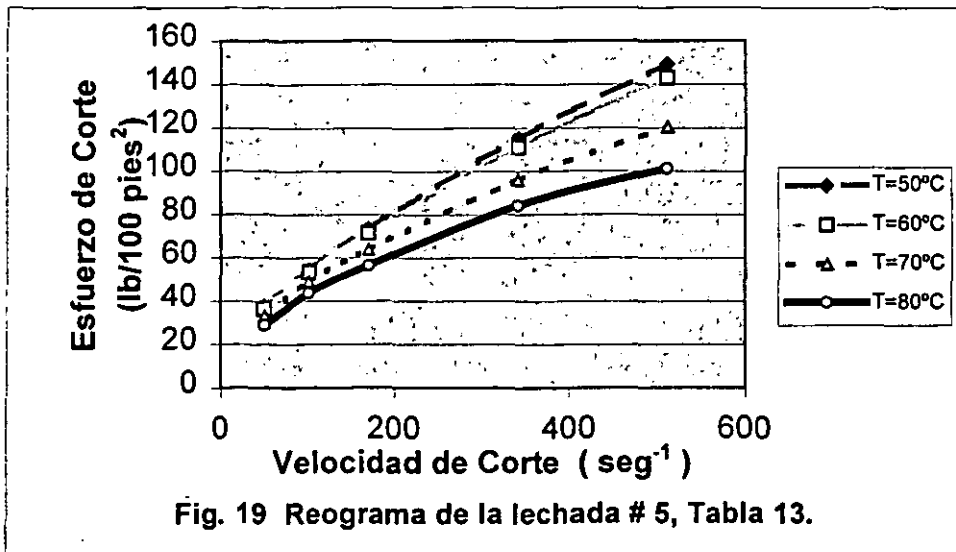
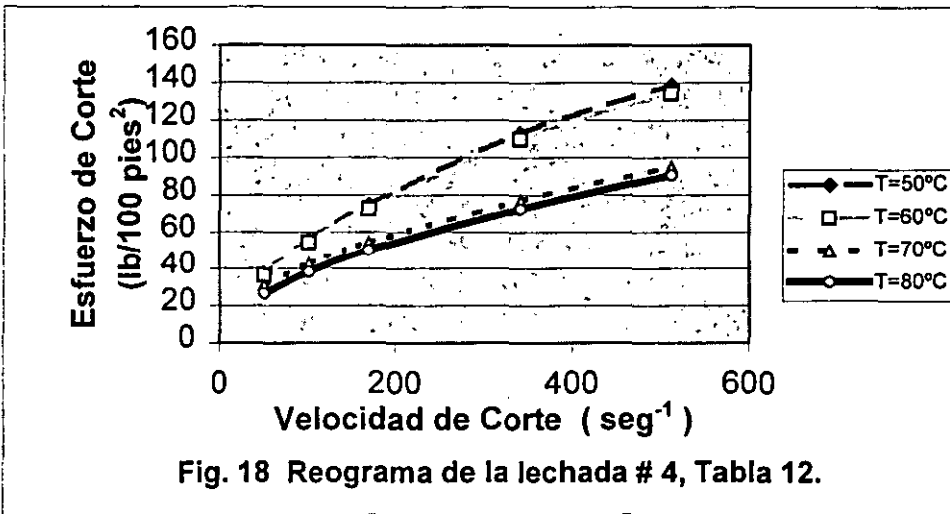
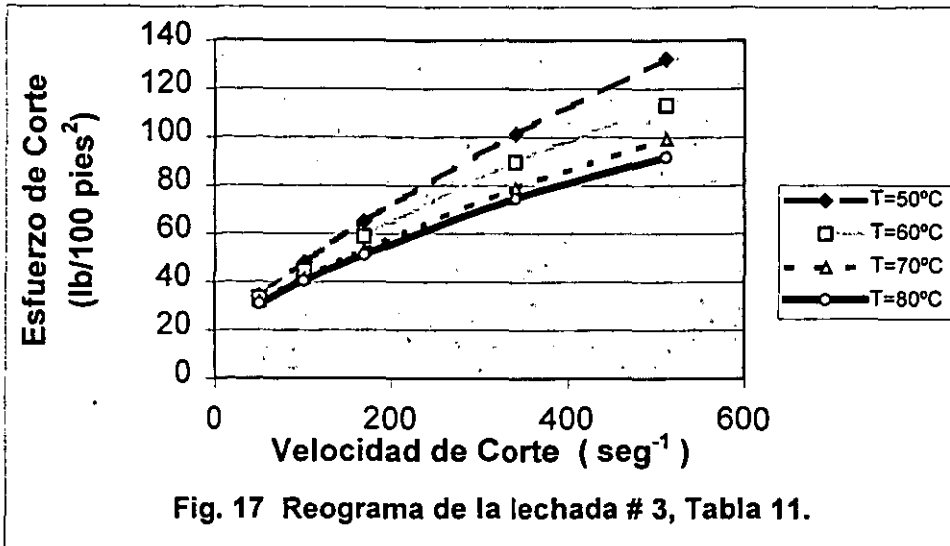
LECHADA #5	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 356P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 3.6gr	51	37.35	36.28	33.08	28.81
FR 3P 1.2 gr	102	54.42	53.35	49.08	43.75
AFP 2.4 gr	170	73.62	71.49	64.02	56.55
Cemento 800 gr	341	115.24	110.97	96.03	84.29
Agua 314.12 gr	511	149.38	142.98	120.57	101.37

Figuras 15-19.

En referencia a los valores obtenidos en el análisis anterior, en este caso se tiene una medida mínima de 26. 68 y una máxima de 34. 14 lb/100 pies² a las mismas condiciones, las cuales son ligeramente menores. Es de notarse que en la lechada # 4 (Fig. 18) se exhibe un comportamiento un tanto diferente en las pruebas realizadas a 60 y 70°C; aunque, claro está, en general las tendencias siguen conservándose y describiendo un desempeño que es posible conjuntar en un modelo dado.

La concentración de dispersante se mantuvo constante e igual al 0.15% y se fue incrementando el contenido de controlador de filtrado.





Lechadas 6 - 10.

Como ya se comentó anteriormente, por cuestiones de existencia de cemento, a partir de la lechada # 6 se emplea un cemento con molienda 62 P. Cabe reiterar que en el caso de la molienda, no tiene gran influencia sobre la reología de la lechada, por lo que para efectos de este trabajo no se involucra como variable. Los resultados obtenidos para estas lechadas se encuentran en las Tablas 14, 15, 16, 17 y 18; a su vez, las gráficas generadas de estas mismas se presentan en las Figuras 20, 21, 22, 23 y 24.

Tabla 14. Propiedades reológicas de la lechada # 6 – esfuerzo de corte.

LECHADA #6 (Molienda 62P)	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.0gr	51	23.47	21.34	19.21	17.07
FR 3P 1.6 gr	102	37.35	33.08	25.61	27.74
AFP 2.4 gr	170	52.28	45.88	42.68	37.35
Cemento 800 gr	341	77.89	68.29	62.95	53.35
Agua 315.19 gr	511	96.03	84.29	76.82	64.02

Tabla 15. Propiedades reológicas de la lechada # 7 – esfuerzo de corte.

LECHADA #7 (Molienda 62P)	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.4gr	51	33.08	29.88	25.61	19.21
FR 3P 1.6 gr	102	51.22	45.88	38.41	32.01
AFP 2.4 gr	170	68.29	60.82	51.22	43.75
Cemento 800 gr	341	101.37	88.56	73.62	62.95
Agua 314.90 gr	511	128.04	109.90	89.63	74.69

Tabla 16. Propiedades reológicas de la lechada # 8 – esfuerzo de corte.

LECHADA #8	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 62P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.8gr	51	34.14	27.74	23.47	20.27
FR 3P 1.6 gr	102	50.15	40.55	34.14	29.88
AFP 2.4 gr	170	68.29	53.35	43.75	39.48
Cemento 800 gr	341	105.63	83.23	66.15	57.62
Agua 314.61 gr	511	133.38	104.57	83.23	72.56

Tabla 17. Propiedades reológicas de la lechada # 9 – esfuerzo de corte.

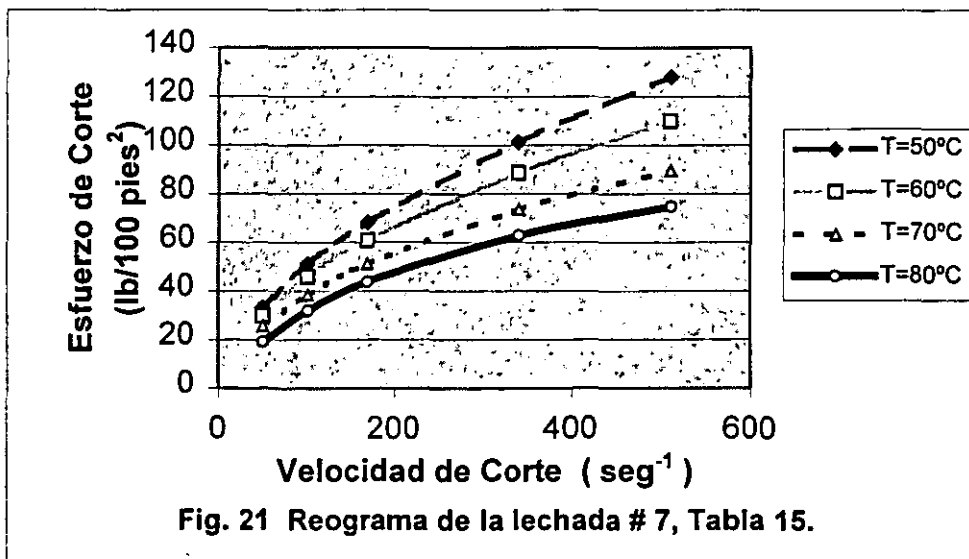
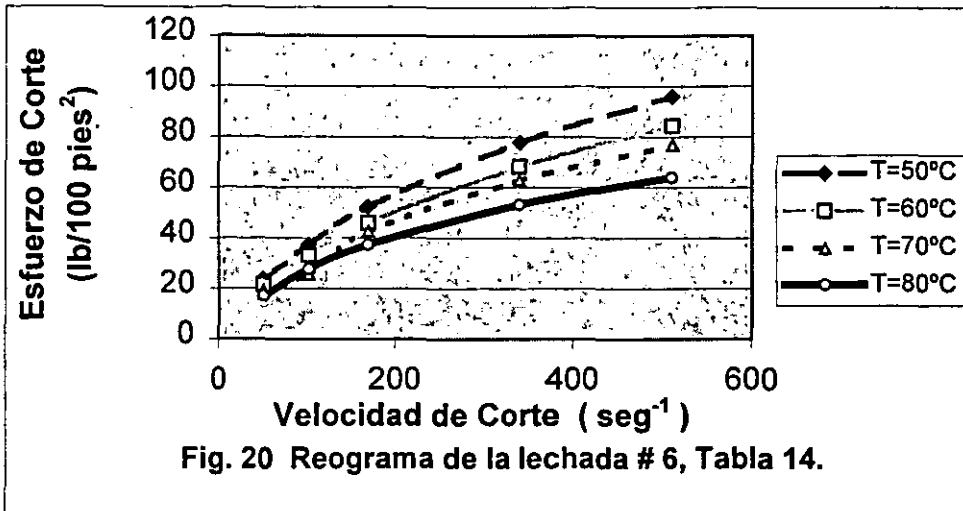
LECHADA #9	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 62P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 3.2gr	51	43.75	37.35	32.01	27.74
FR 3P 1.6 gr	102	66.15	53.35	46.95	40.55
AFP 2.4 gr	170	87.49	72.56	59.75	50.15
Cemento 800 gr	341	130.17	104.57	88.56	69.36
Agua 314.31 gr	511	160.05	129.11	109.90	84.29

Tabla 18. Propiedades reológicas de la lechada # 10 – esfuerzo de corte.

LECHADA #10	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 62P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 3.6gr	51	49.08	41.61	36.28	30.94
FR 3P 1.6 gr	102	72.56	59.75	51.22	45.88
AFP 2.4 gr	170	94.96	81.09	66.15	55.48
Cemento 800 gr	341	145.11	120.57	94.96	78.96
Agua 314.02 gr	511	181.39	149.38	118.44	96.03

Figuras 20-24.

A partir de la lechada # 6 se incrementa la cantidad de dispersante en la mezcla de 0.15 a 0.20% (manteniéndose constante), variando únicamente el contenido de controlador de filtrado de 0.25 a 0.45%.



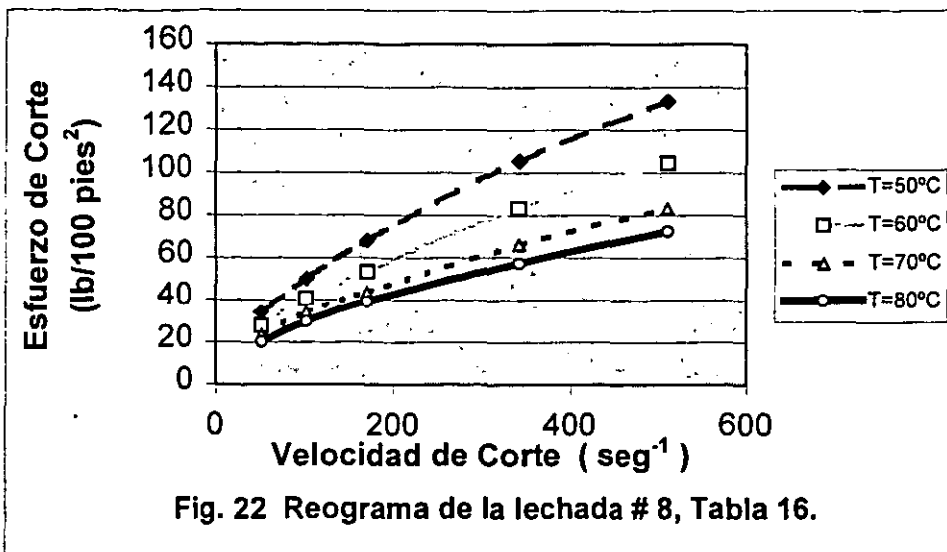


Fig. 22 Reograma de la lechada # 8, Tabla 16.

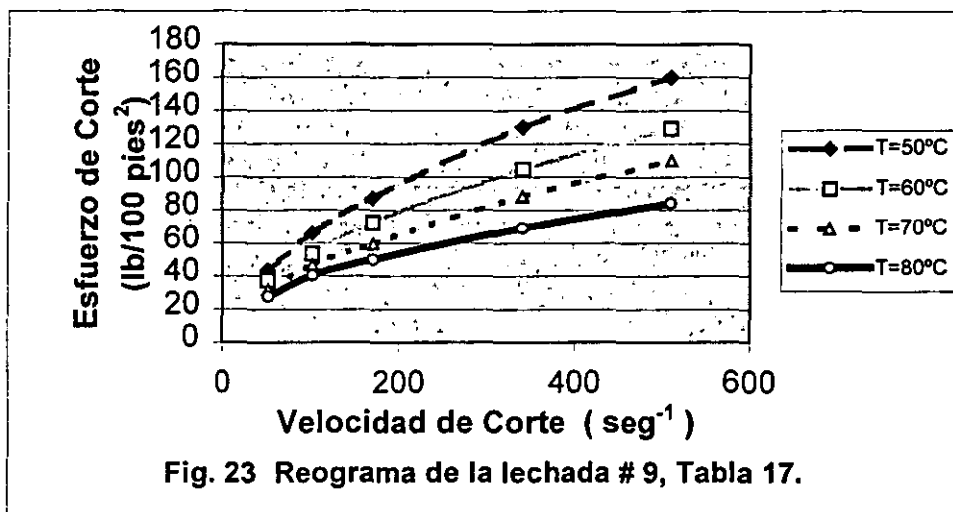


Fig. 23 Reograma de la lechada # 9, Tabla 17.

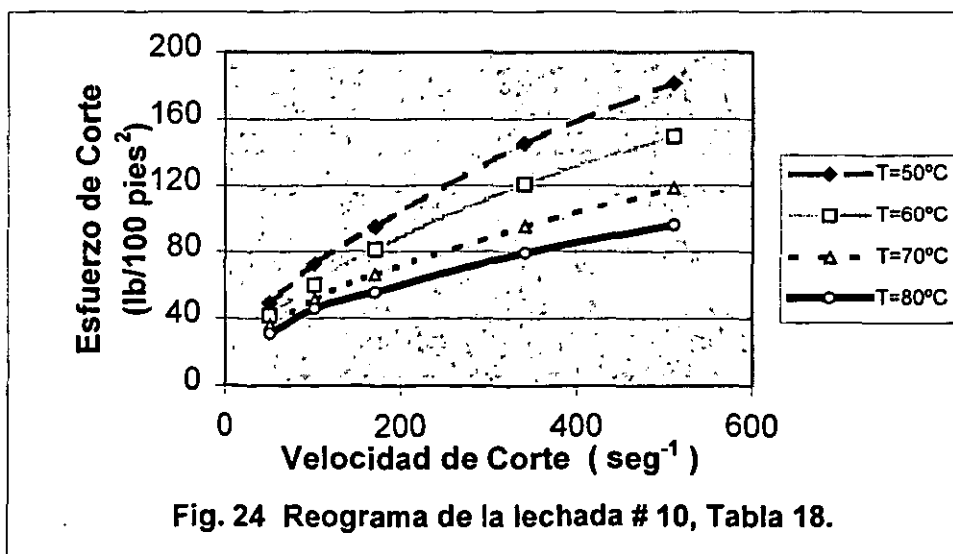


Fig. 24 Reograma de la lechada # 10, Tabla 18.

Debido a la función del dispersante en la mezcla, éste tiende a homogeneizar la distribución de sólidos, es posible ver este efecto a bajas velocidades de corte, aunque conforme se incrementa la cantidad de controlador de filtrado y la velocidad de corte, asimismo se incrementa el esfuerzo de corte. Para el caso de la lechada # 1 a 50°C y 51 seg^{-1} , se obtuvo un valor de 26.68, en tanto que en la lechada # 6 para las mismas condiciones resultó de 23.47 lb/100 pies².

Por otro lado, en la lechada # 5 a 50°C y 511 seg^{-1} se obtuvo un valor de 149.38 que para el caso de la lechada # 10 en idénticas situaciones fue de 181.39 lb/100 pies², esto debido a la mayor cantidad de sólidos en la mezcla. Puede verse que este efecto lo revierte la temperatura, ya que a 80°C y 511 seg^{-1} – para las mismas lechadas – resultaron 101.37 y 96.03 lb /100 pies² respectivamente. Esto es, no obstante el tener una mayor cantidad de sólidos la muestra # 10 (dispersante), el efecto de la temperatura influye y abate el esfuerzo de corte resultante.

Nuevamente puede observarse la interacción de las tres variables que están rigiendo el proceso en la reología de las lechadas estudiadas.

Lechadas 11 - 15.

Los resultados se presentan en las Tablas 19, 20, 21, 22 y 23 y las gráficas correspondientes se muestran en las Figuras 25, 26, 27, 28 y 29. La molienda de cemento continúa siendo 62P.

Tabla 19. Propiedades reológicas de la lechada # 11 – esfuerzo de corte.

LECHADA #11	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 62P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.0gr	51	21.34	19.21	16.01	13.87
FR 3P 2.0 gr	102	32.01	27.74	22.41	20.27
AFP 2.4 gr	170	42.68	35.21	27.74	25.61
Cemento 800 gr	341	66.15	54.42	41.61	37.35
Agua 315.09 gr	511	83.23	68.29	54.42	48.02

Tabla 20. Propiedades reológicas de le lechada # 12 – esfuerzo de corte.

LECHADA #12	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 62P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.4gr	51	30.94	26.68	22.41	17.07
FR 3P 2.0 gr	102	45.88	39.48	34.14	24.54
AFP 2.4 gr	170	62.95	54.42	43.75	33.08
Cemento 800 gr	341	97.10	84.29	64.02	46.95
Agua 314.80 gr	511	122.71	105.63	81.09	58.69

Tabla 21. Propiedades reológicas de la lechada # 13 – esfuerzo de corte.

LECHADA #13	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 62P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.8gr	51	33.08	27.74	23.47	19.21
FR 3P 2.0 gr	102	50.15	42.68	37.35	28.81
AFP 2.4 gr	170	69.36	58.69	49.08	36.28
Cemento 800 gr	341	109.90	92.83	72.56	53.35
Agua 314.50 gr	511	137.64	116.30	97.10	65.09

Tabla 22. Propiedades reológicas de la lechada # 14 – esfuerzo de corte.

LECHADA #14	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 62P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 3.2gr	51	39.48	33.08	27.74	21.34
FR 3P 2.0 gr	102	64.02	53.35	41.61	32.01
AFP 2.4 gr	170	86.43	72.56	58.69	42.68
Cemento 800 gr	341	129.11	112.04	89.63	65.09
Agua 314.21 gr	511	157.92	138.71	113.10	82.16

Tabla 23. Propiedades reológicas de la lechada # 15 – esfuerzo de corte.

LECHADA #15	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
(Molienda 62P)	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 3.6gr	51	41.61	36.28	32.01	26.68
FR 3P 2.0 gr	102	69.36	60.82	51.22	41.61
AFP 2.4 gr	170	92.83	82.16	67.22	53.35
Cemento 800 gr	341	141.91	125.91	104.57	78.96
Agua 313.92 gr	511	174.99	154.72	128.04	97.10

Figuras 25-29.

Ahora se incrementa el porcentaje de dispersante en la mezcla de 0.20 a 0.25% y se mantiene constante, mientras se va aumentando la concentración del controlador de filtrado para observar diferencias.

Para las pruebas con estas lechadas puede decirse que la influencia del dispersante es muy notoria, ya que la tendencia de disminución de los esfuerzos de corte se aprecia claramente. Sólo en la lechada # 15 a 60°C y 70°C discrepa con esta afirmación, pero en las lechadas a 80°C se repite nuevamente esta tendencia. El comportamiento de la diferencia en las lecturas a iguales velocidades de corte es similar al mencionado en las anteriores lechadas.

4. DESARROLLO MODELO MATEMÁTICO

La muestra se observa bastante fluida y sobre todo no se ven señales de sedimentación de la misma en ninguna etapa del proceso.

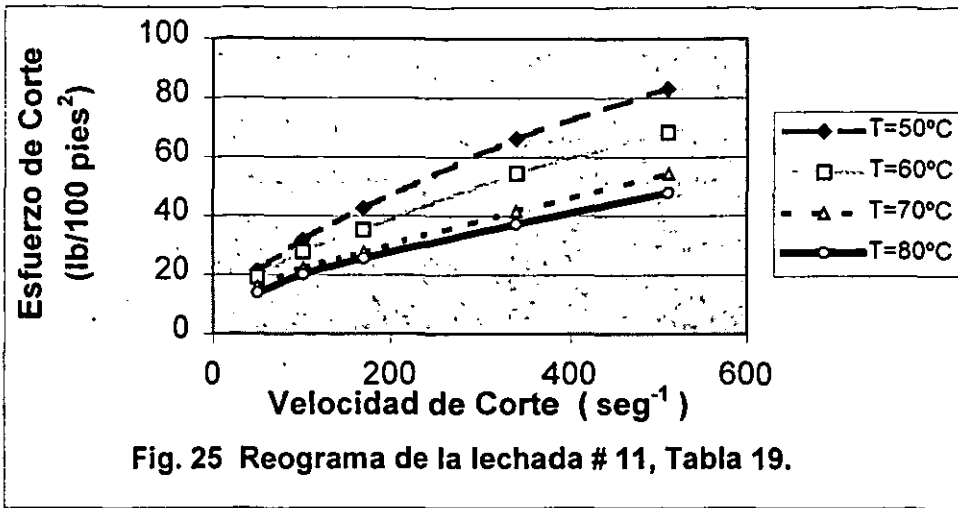


Fig. 25 Reograma de la lechada # 11, Tabla 19.

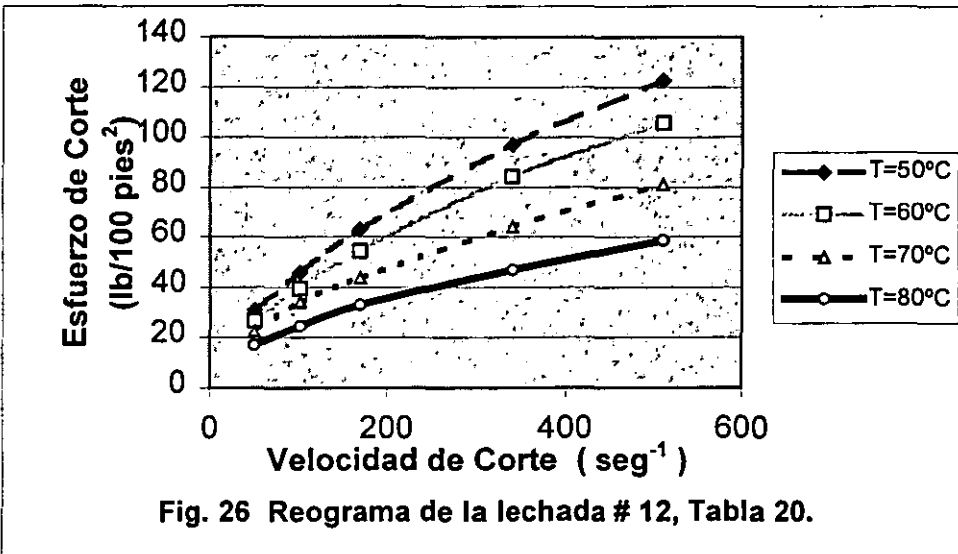


Fig. 26 Reograma de la lechada # 12, Tabla 20.

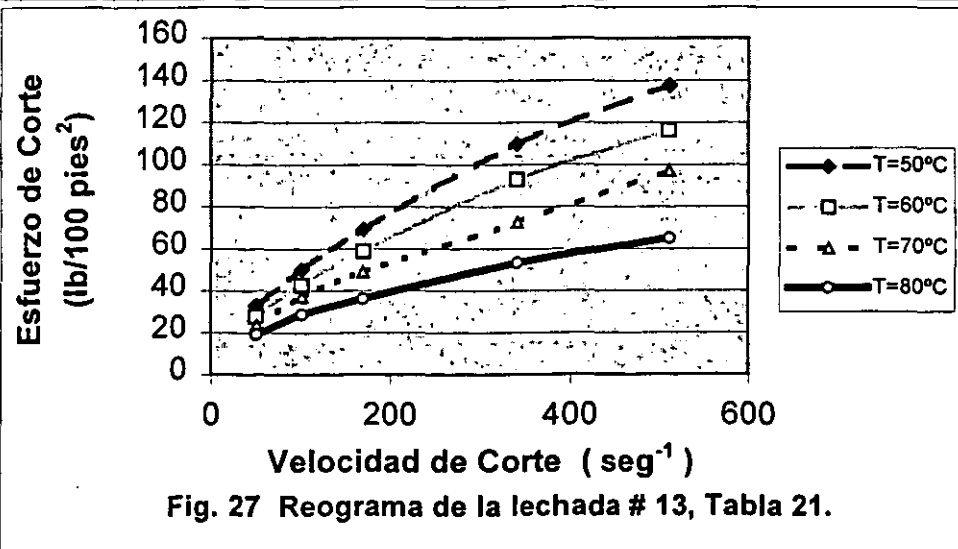


Fig. 27 Reograma de la lechada # 13, Tabla 21.

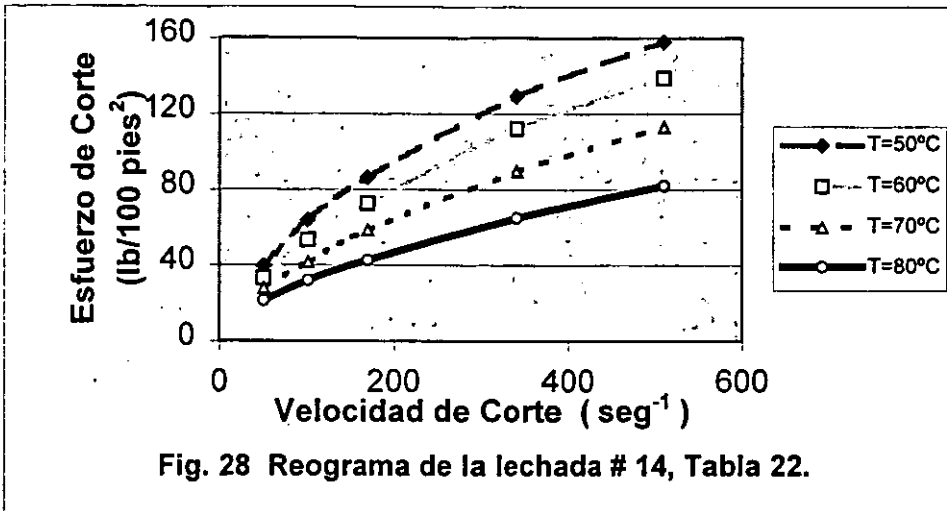


Fig. 28 Reograma de la lechada # 14, Tabla 22.

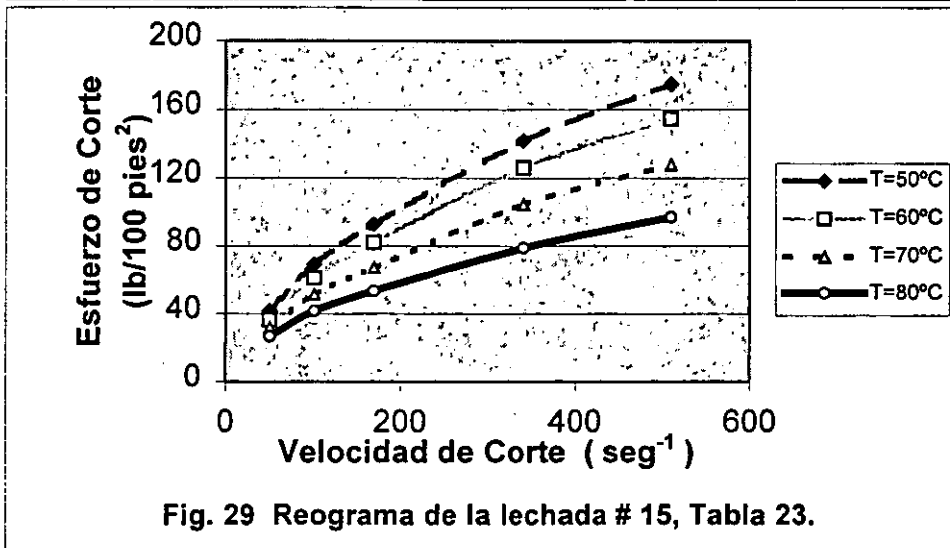


Fig. 29 Reograma de la lechada # 15, Tabla 23.

Lechadas 16 y 17.

En estas últimas pruebas sólo se obtuvieron resultados experimentales en las lechadas 16 y 17 ya que a partir de la lechada # 18 se empezaron a observar problemas de sedimentación, esto debido más que nada a la alta concentración de dispersante en la mezcla, lo que revierte la función del mismo. Por otra parte, aunado a este efecto y el de la temperatura, ocasionan que la mezcla se vuelva demasiado pastosa, esto es, se presenta un comportamiento reológico fuera de escala.

Los resultados se presentan en las Tablas 24 y 25 y sus gráficas correspondientes en las Figuras 30 y 31.

Tabla 24. Propiedades reológicas de la lechada # 16 – esfuerzo de corte.

LECHADA #16 (Molienda 62P)	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.0gr	51	18.14	17.07	16.01	13.87
FR 3P 2.4 gr	102	32.01	25.61	24.54	21.34
AFP 2.4 gr	170	43.75	36.28	34.14	28.81
Cemento 800 gr	341	68.29	58.69	53.35	46.95
Agua 314.99 gr	511	86.43	76.82	71.49	62.95

Tabla 25. Propiedades reológicas de la lechada # 17 – esfuerzo de corte.

LECHADA #17 (Molienda 62P)	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
FL 12 2.4gr	51	24.54	21.34	20.27	17.07
FR 3P 2.4 gr	102	39.48	34.14	28.81	24.54
AFP 2.4 gr	170	55.48	49.08	40.55	33.08
Cemento 800 gr	341	92.83	82.16	69.36	52.28
Agua 314.70 gr	511	118.44	106.70	90.70	67.22

Figuras 30-31.

En estas pruebas se incrementa el contenido de dispersante en las lechadas, de 0.25% a 0.30% y variando como siempre la concentración del controlador de filtrado. Sólo fue posible realizar dos pruebas, esto es, hasta una cantidad del 0.30% de FL12, ya que en la muestra siguiente se observó una ligera

sedimentación, amén, que con el incremento de la temperatura se presentó una floculación muy importante.

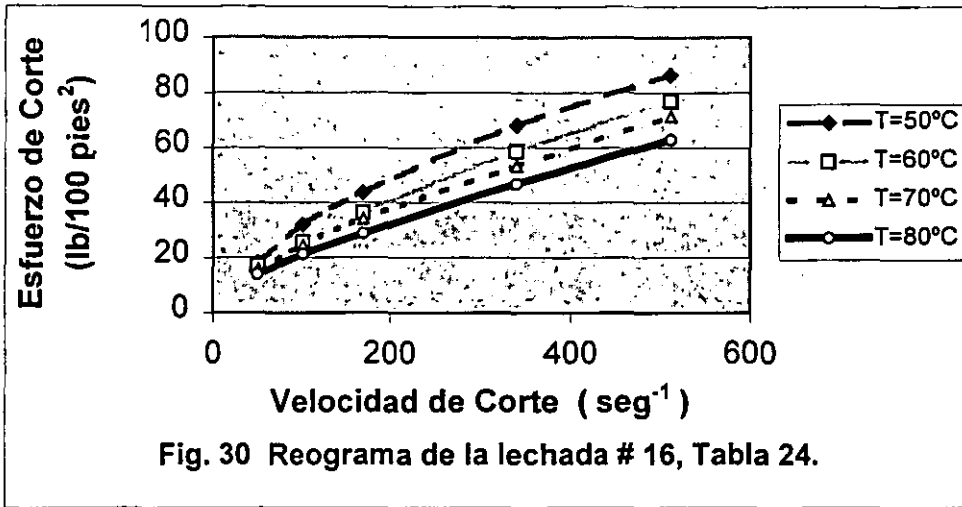


Fig. 30 Reograma de la lechada # 16, Tabla 24.

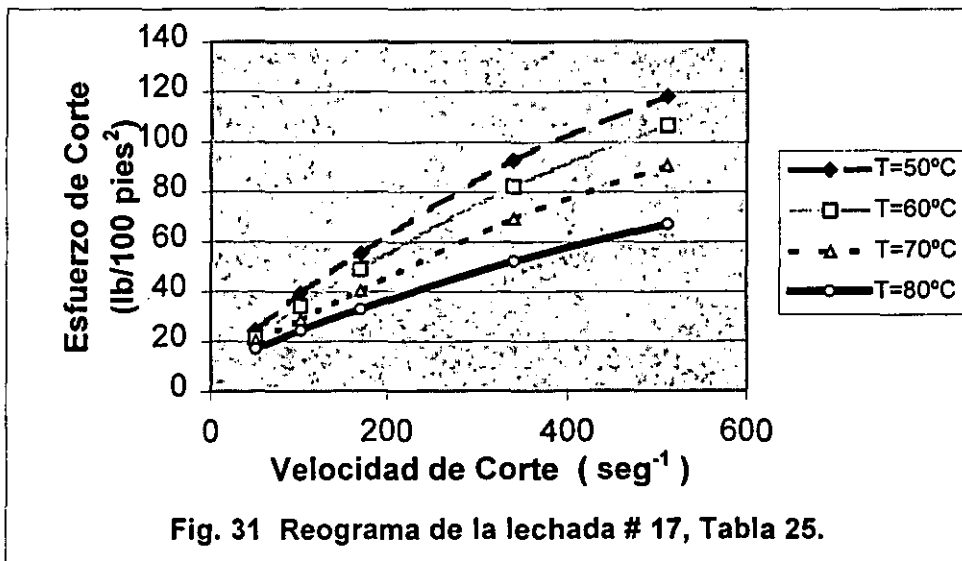


Fig. 31 Reograma de la lechada # 17, Tabla 25.

Para estos casos bien pudiera pensarse que el comportamiento fuera similar al análisis anterior – considerando que ahora hay una mayor cantidad de dispersante – sin embargo, el desempeño indica que la saturación de FR3P está por alcanzarse, ya que el incremento de lecturas observado indica que la tendencia narrada en las pruebas anteriores inicia a revertirse.

Es importante destacar que todas las mediciones a 50°C se realizaron en ciclo de histéresis para descartar la posibilidad de sedimentación alguna. Para la lechada # 18 se observó claramente los indicios de sedimentación ya que las lecturas observadas en el ciclo de regreso siempre estuvieron por debajo del ciclo de ida.

Puede observarse que a velocidades de corte bajas (51 y 102 seg^{-1}), para el caso de la lechada # 11 a 50°C y 60°C se tienen 21.34 $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$ y 19.21 $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$, en tanto que para la lechada # 16 resultan 18.14 $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$ y 17.07 $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$, lo que demuestra la influencia del dispersante. Finalmente, la tendencia de aumento de los esfuerzos de corte y aún con el incremento de temperatura es notable. Esto es, puede verse que en la lechada # 12 a 80°C y 511 seg^{-1} se tiene 58.69 $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$ y para la lechada # 17 es de 67.22 $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$.

4.3 Programa de cómputo CEMENTO NO LINEAL.

En función de los resultados de la experimentación y tomando en consideración todas y cada una de las gráficas obtenidas, se procedió a ajustar una ecuación representativa²¹, es decir, un ajuste no lineal tomando en cuenta las variables que intervienen en el proceso a saber: T, temperatura a la cual se realiza la medición (° C); F, que representa la concentración de aditivo controlador de filtrado en la mezcla (%) y D, la cual expresa el porcentaje de dispersante que contiene la lechada (%).

El ajuste obtenido es del tipo exponencial y considera la inclusión de seis constantes dentro de la ecuación representativa, mismas que justamente son calculadas por el programa de cómputo CEMENTO NO LINEAL, escrito en lenguaje FORTRAN 77. El detalle del procedimiento de dicho programa se enlista en el Apéndice A. El modelo ajustado obedece a la forma:

$$\tau = a_1 (\gamma + a_2)^{a_3} T^{a_4} F^{a_5} D^{a_6} \quad (5)$$

Suposiciones del modelo.

- 1.- Régimen de flujo laminar.
- 2.- No está definido para valores de $\gamma = 0$.
- 3.- El rango de temperatura es exclusivo de 50 a 80 ° C.
- 4.- Le densidad de las lechadas es constante e igual a 1.95 gr/cm³.

El programa calcula el valor de las constantes que mejor se ajuste de acuerdo a los datos que se obtuvieron de la experimentación, esto es, valores de velocidad de corte (seg⁻¹) contra esfuerzo de corte (lb/100 pies²) para todas las lechadas anteriormente descritas. Para el presente trabajo se obtuvieron los siguientes valores:

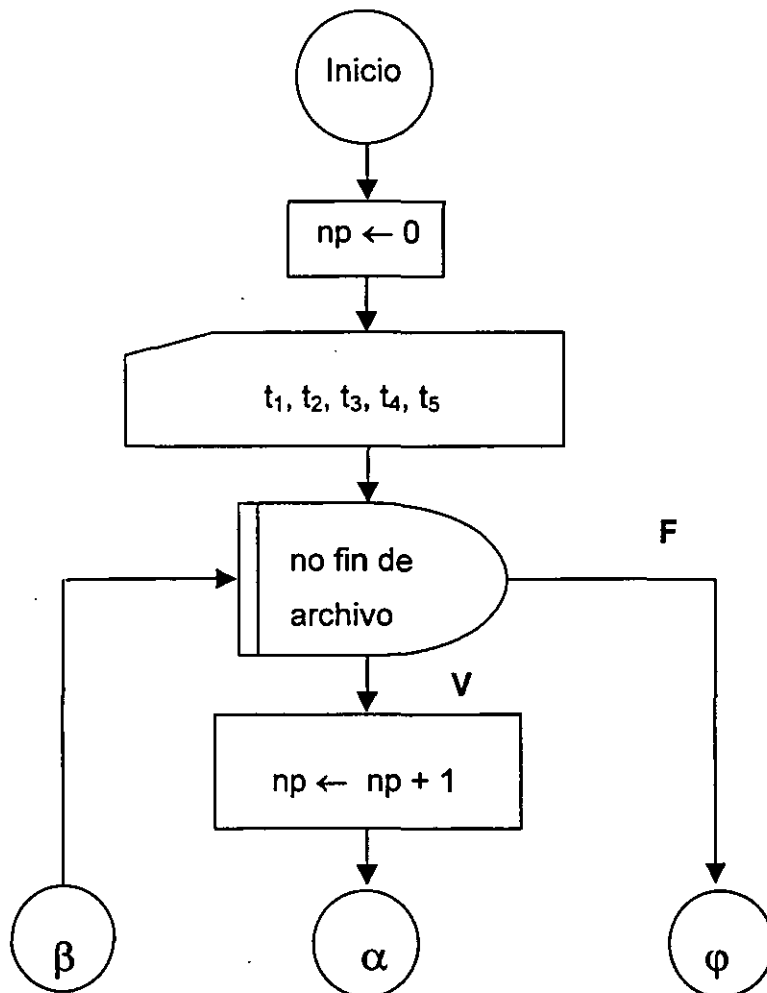
$$\begin{aligned} a_1 &= 475.872 \\ a_2 &= - 0.337352 \\ a_3 &= 0.569961 \\ a_4 &= - 1.01184 \\ a_5 &= 0.909793 \\ a_6 &= - 0.0664409 \end{aligned}$$

Substituyendo estos valores en la Ec. (5) resulta la ecuación representativa objeto de este trabajo.

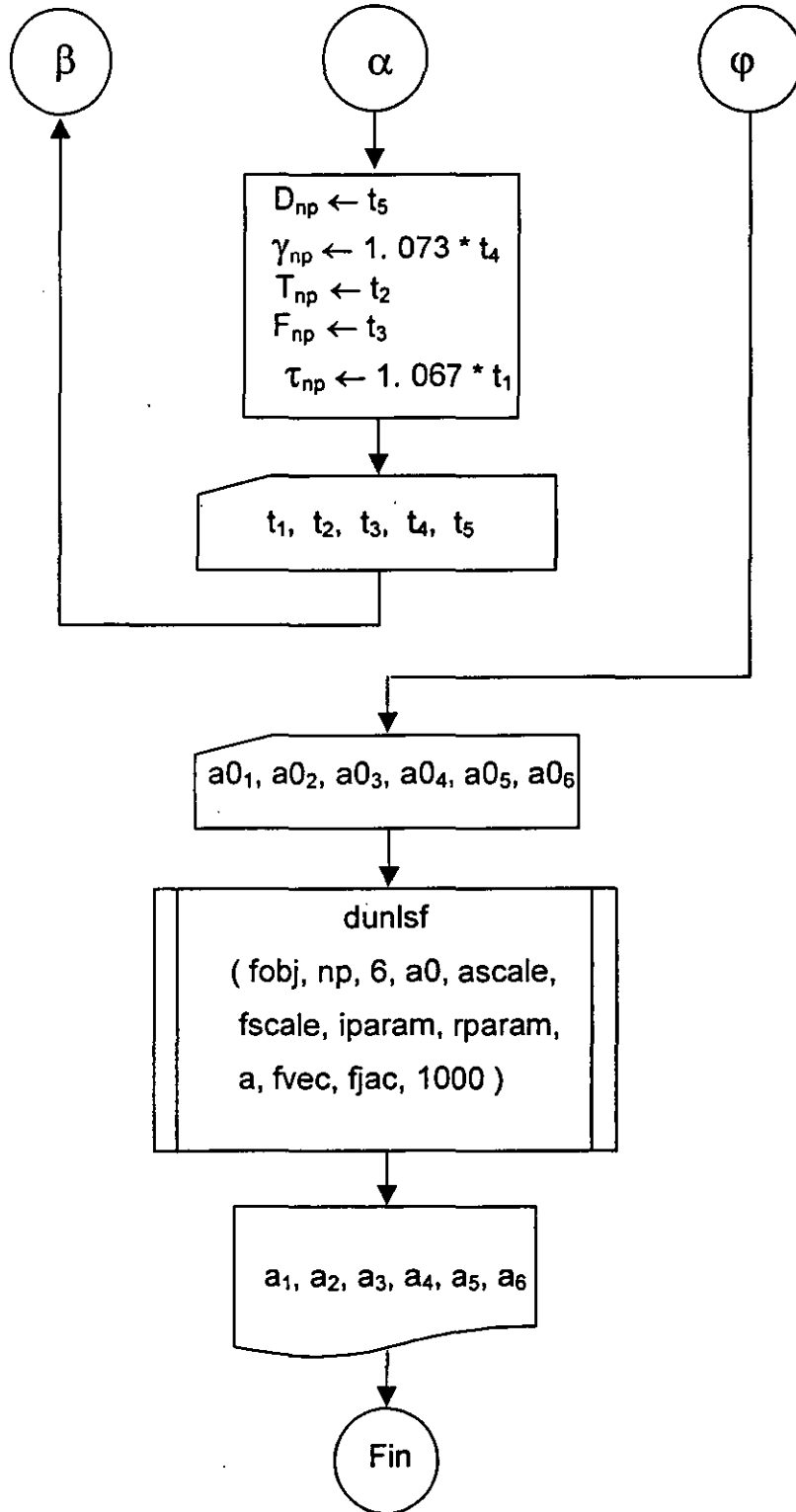
$$\tau = 475.872 (\gamma - 0.337352)^{0.569961} T^{-1.01184} F^{0.909793} D^{-0.0664409} \quad (6)$$

Cabe hacer notar que la ecuación anterior comprende un rango de temperatura de 50 a 80 °C y dentro del rango de velocidades de corte entre 30 y 300 rpm. Previamente se establecieron las razones que explican el por qué de esta limitación.

La secuencia de pasos en los cálculos del programa CEMENTO NO LINEAL es expresada en el diagrama de flujo siguiente.



4. DESARROLLO MODELO MATEMÁTICO



La ecuación (6) viene dada en:

τ = Esfuerzo de corte, lb/100 pies².

γ = Velocidad de corte, seg⁻¹.

T = Temperatura, °C.

F = Contenido de aditivo controlador de filtrado, %.

D = Contenido de dispersante, %.

En el Apéndice B se detallan las Tablas con los resultados del programa de cómputo en donde se incluyen los datos que alimentan al programa. En la primer columna aparece la velocidad de corte expresada en seg⁻¹ (51.090, 102.180, 170.3, 340.6 y 510.9) que corresponden a 30, 60, 100, 200 y 300 rpm; en la segunda se establece la temperatura a la cual se efectuó la medición; seguidamente la concentración de aditivo controlador de filtrado en la lechada medido en %; en la cuarta columna se encuentra la concentración de dispersante de la mezcla en % y finalmente, aparece el esfuerzo de corte registrado en la prueba expresado en lb/100 pies² . Las últimas tres columnas representan los resultados que proporciona el programa, esto es, el esfuerzo de corte calculado con la Ec. (6) en lb/100 pies². Posteriormente se determina el error relativo dividiendo la diferencia entre el esfuerzo de corte calculado y el medido en la prueba. En la última columna se muestran los residuos que se obtienen de la diferencia de los esfuerzos de corte.

4.4 Derivación de ecuaciones de flujo.¹¹

Para este caso se tendrá una buena aproximación al considerarse como si se tratara de un flujo entre placas paralelas¹⁶. De este modo, consideramos el flujo entre dos placas paralelas estacionarias de longitud L y ancho b, separadas por un espacio $d = 2R$. Primeramente, la ecuación de cantidad de movimiento toma la forma:

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{\Delta P}{L} \quad (7)$$

Suponiendo que la cantidad de flujo de cantidad de movimiento es 0 en $x = 0$ e integrando la Ec. (7) obtenemos la distribución de densidad de flujo de cantidad de movimiento:

$$\tau = \frac{\Delta P}{L} x \quad (8)$$

Esta distribución se muestra en la Fig. 32 donde se indican las variables que intervienen en el proceso y que es el punto de partida en la derivación que se está tratando.

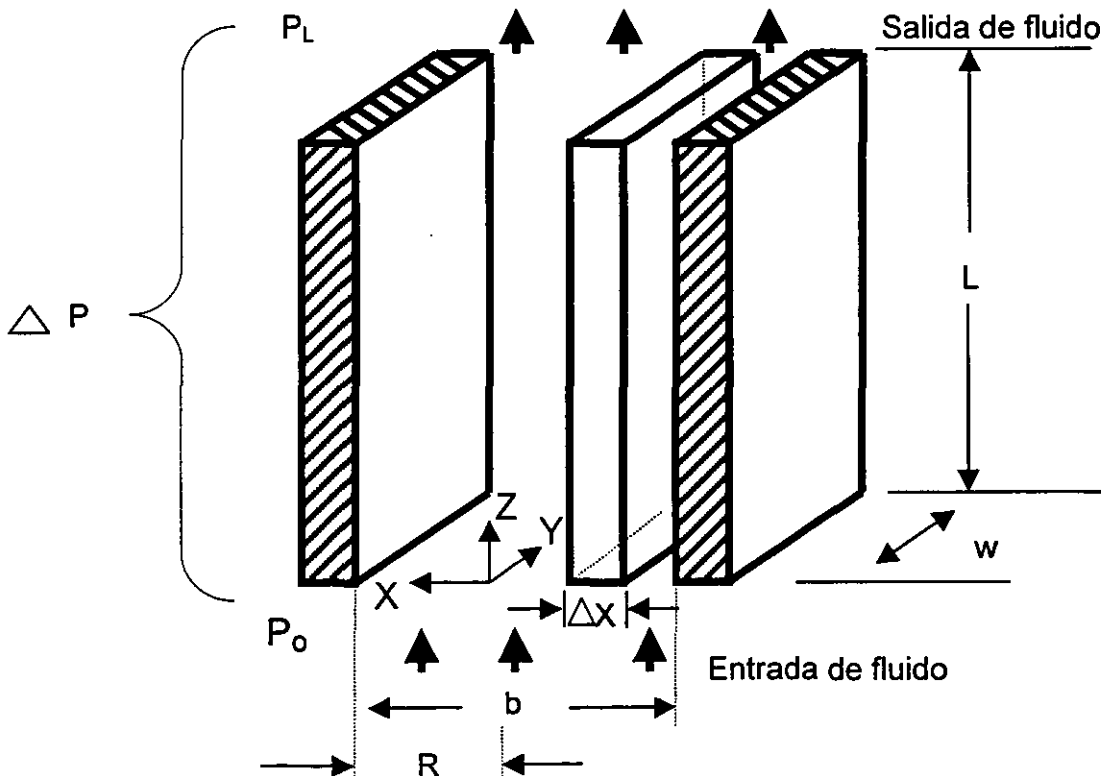


Fig. 32. Geometría y distribución de densidad de flujo de cantidad de movimiento para circulación entre placas paralelas.

4. DESARROLLO MODELO MATEMÁTICO

Combinando la ecuación del modelo propuesto (6) con la ecuación correspondiente a la distribución antes mencionada (8), se tendrá:

$$\tau = 475.872 (\gamma - 0.337352)^{0.569961} T^{-1.01184} F^{0.909793} D^{-0.0664409}$$

y haciendo las siguientes consideraciones:

$$K = T^{-1.01184} F^{0.909793} D^{-0.0664409}$$

$$\gamma = - \frac{dv}{dx}$$

se llega a la ecuación diferencial siguiente para la velocidad:

$$\left(\frac{\Delta P}{L} \right) x = 475.872 \left(- \frac{dv}{dx} - 0.337352 \right)^{0.569961} K$$

$$\int \frac{dv}{dx} = \int - \left(\frac{0.0021014}{K} \frac{\Delta P}{L} \right)^{1.754506} x^{1.754506} - 0.337352$$

$$v + C_1 = - \left(\frac{0.0021014}{K} \frac{\Delta P}{L} \right)^{1.754506} \frac{x^{2.754506}}{2.754506} - 0.337352 x$$

Aplicando la condición de frontera que para $x = R \rightarrow v = 0$

$$C_1 = - \left(\frac{0.0021014}{K} \frac{\Delta P}{L} \right)^{1.754506} \frac{R^{2.754506}}{2.754506} - 0.337352 R$$

4. DESARROLLO MODELO MATEMÁTICO

Substituyendo la constante de integración encontrada, factorizando y reemplazando a K por su forma original, tendremos la ecuación resultante para el perfil de velocidad:

$$v = \left[\frac{0.0021014}{T^{-1.01184} F^{0.909793} D^{-0.0664409}} \frac{\Delta P}{L} \right]^{1.754506} \left[0.363042 (R^{2.754506} - x^{2.754506}) + 0.337352 (R - x) \right] \quad (9)$$

El gasto volumétrico está dado por:

$$q = v A,$$

donde de acuerdo a la Fig. 32, el área de flujo está dada por :

$$A = 2 R b$$

de donde,

$$q = 2 R b v = 2 b \int_0^R v dx$$

denominando a K_1 :

$$K_1 = \left[\frac{0.0021014}{T^{-1.01184} F^{0.909793} D^{-0.0664409}} \frac{\Delta P}{L} \right]^{1.754506}$$

y substituyendo el valor de "v" recientemente encontrado, se tiene:

$$\begin{aligned} \int_0^R v dx &= \int_0^R \left[0.363042 K_1 (R^{2.754506} - x^{2.754506}) + 0.337352 (R - x) \right] dx \\ &= \left[0.363042 K_1 (R^{2.754506} - x^{2.754506}) + 0.337352 (R - x) \right] R \end{aligned}$$

$$q = 0.363042 K_1 R (R^{2.754506} - x^{2.754506}) + 0.337352 R (R - x)$$

y finalmente,

$$q = 2 b \left\{ \left(\frac{0.0021014}{T^{-1.01184} F^{0.909793} D^{-0.0664409}} \frac{\Delta P}{L} \right)^{1.754506} 0.363042 R (R^{2.754506} - x^{2.754506}) + 0.337352 R (R - x) \right\}. \quad (10)$$

Con la Ec. (9) se calcula el perfil de velocidad correspondiente, aunque no considera el valor de cedencia de la lechada por la problemática de las mediciones reológicas a bajas velocidades de corte, las cuales en el presente trabajo se soslayaron por motivos ya expuestos.

Por su parte la Ec. (10) calcula el gasto volumétrico entre placas paralelas, que representa físicamente el espacio anular comprendido entre la formación y la tubería de revestimiento. Ambas expresiones fueron derivadas considerando la ecuación constitutiva del modelo propuesto (Ec. 6) obviamente para el rango de temperatura especificado en el desarrollo experimental (50 - 80 °C).

5. VALIDACIÓN DEL MODELO.

5.1. Comparación de modelos reológicos.

Tomando en consideración que la ecuación representativa del modelo propuesto es del tipo exponencial, para llevar a cabo la validación del mismo se procederá a realizar una comparación entre los resultados del cálculo analítico de esfuerzos mediante el modelo propuesto Ec. (6) y los correspondientes utilizando los distintos modelos exponenciales a saber: Ley de Potencias (LP), Herschel - Bulkley (HB) y el de Robertson - Stiff (RS).

Para realizar dicha comparación se seleccionaron tres formulaciones de lechadas cuyo contenido de aditivos (control de filtrado y dispersante) se encuentran dentro del rango de las 17 formulaciones de lechadas experimentadas en la sección 4.2.3.3 y que se presentan en las Tablas 26, 27 y 28.

El detalle del procedimiento seguido es el mismo que el expresado en la sección antes referida. Cabe señalar que para completar el cálculo de las constantes reológicas de los modelos de Ley de Potencias y Herschel - Bulkley fue necesario el tomar la lectura a 600 rpm (1022 seg^{-1}) así como la gelatinosidad inicial (Gel_0) para cada muestra preparada. Finalmente, estas tres últimas muestras se designaron como 1P, 2P y 3P.

Tabla 26. Propiedades reológicas de la lechada # 1P – esfuerzo de corte.

LECHADA #1P (Molienda 62P)	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
Densidad	51	28.81	24.54	20.27	17.07
1. 95 gr/cm ³	102	40.55	35.21	29.88	25.61
FL 12 2.16 gr	170	50.15	40.55	36.28	33.08
FR 3P 1.44 gr	341	73.62	60.82	53.35	49.08
AFP 2.40 gr	511	97.10	82.16	72.56	61.89
Cemento 800 gr	1022	169.65	155.78	141.91	121.64
Agua 315.12 gr	Gel ₀	9.60	8.54	7.47	5.33

Tabla 27. Propiedades reológicas de la lechada # 2P, esfuerzo de corte.

LECHADA #2P (Molienda 62P)	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
Densidad	51	35.21	29.88	25.61	22.41
1. 95 gr/cm ³	102	57.62	46.95	39.48	34.14
FL 12 3.04 gr	170	73.62	65.09	54.42	44.81
FR 3P 1.76 gr	341	120.57	98.16	80.03	68.29
AFP 2.40 gr	511	148.31	129.11	105.63	89.63
Cemento 800 gr	1022	179.26	165.39	150.45	131.24
Agua 314.39 gr	Gel ₀	12.80	10.67	9.60	7.47

Tabla 28. Propiedades reológicas de la lechada # 3P – esfuerzo de corte.

LECHADA #3P (Molienda 62P)	Temperatura	50°C	60°C	70°C	80°C
	seg ⁻¹	lb	/	100	pies ²
Densidad	51	41.61	34.14	29.88	25.61
1. 95 gr/cm ³	102	61.89	49.08	42.68	38.41
FL 12 3.44 gr	170	83.23	68.29	58.69	50.15
FR 3P 2.24 gr	341	122.71	100.30	88.56	75.76
AFP 2.40 gr	511	152.58	129.11	105.63	96.03
Cemento 800 gr	1022	195.26	180.32	160.05	139.78
Agua 313.97 gr	Gel ₀	14.94	11.74	9.60	8.54

Con los datos presentados en las tablas anteriores, producto de las experimentaciones ya mencionadas, y siguiendo el procedimiento de cálculo de las constantes reológicas descrito en el Capítulo 3, es posible llegar a las tablas que a continuación se presentan y que resumen el objetivo del presente trabajo, es decir, proponer un nuevo modelo reológico y calcular analíticamente los

esfuerzos de corte, para finalmente compararlo con los modelos reológicos tradicionales.

En las dos primeras columnas se presentan los datos que proporcionan la experimentación, esto es, velocidad de corte de la prueba y su correspondiente valor de esfuerzo cortante medido. Posteriormente, en las siguientes cuatro columnas se calculan analíticamente los esfuerzos cortantes que corresponden a la velocidad de corte en cuestión, aplicando el modelo propuesto (MP), Ley de Potencias (LP), Herschel - Bulkley (HB) y Robertson - Stiff (RS). Finalmente se determina un error relativo para cada modelo.

Los resultados vienen expuestos de la Tabla 29 a la Tabla 40.

Tabla 29. Comparación de modelos reológicos Lechada 1P (T=50°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	28.81	28.98	15.20	21.37	30.11	0.0060	-0.4722	-0.2584	0.0452
102	40.55	43.11	26.56	31.11	38.47	0.0631	-0.3451	-0.2327	-0.0514
170	50.15	57.72	40.06	43.16	49.21	0.1509	-0.2013	-0.1393	-0.0188
341	73.62	85.88	70.13	71.13	74.90	0.1665	-0.0474	-0.0339	0.0173
511	97.10	108.16	97.10	97.10	99.18	0.1139	0.0000	0.0000	0.0214
1022	169.65	160.59	169.60	169.59	167.81	-0.0534	-0.0003	-0.0003	-0.0108

Tabla 30. Comparación de modelos reológicos Lechada 1P (T=60°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	24.54	24.10	9.80	15.90	26.07	-0.0179	-0.6005	-0.3522	0.0624
102	35.21	35.84	18.58	23.25	32.20	0.0180	-0.4722	-0.3397	-0.0856
170	40.55	48.00	29.77	33.05	40.52	0.1836	-0.2659	-0.1850	-0.0006
341	60.82	71.41	56.57	57.68	62.08	0.1741	-0.0698	-0.0516	0.0208
511	82.16	89.94	82.16	82.16	84.19	0.0947	0.0000	0.0000	0.0247
1022	155.78	133.54	155.72	155.72	153.40	-0.1428	-0.0004	-0.0004	-0.0153

Tabla 31. Comparación de modelos reológicos Lechada 1P (T=70°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	20.27	20.62	7.81	13.31	21.85	0.0173	-0.6147	-0.3431	0.0781
102	29.88	30.67	15.27	19.54	27.43	0.0264	-0.4889	-0.3461	-0.0819
170	36.28	41.06	25.03	28.06	35.04	0.1319	-0.3102	-0.2266	-0.0342
341	53.35	61.10	49.07	50.11	54.83	0.1452	-0.0803	-0.0608	0.0277
511	72.56	76.95	72.56	72.56	75.21	0.0605	0.0000	0.0000	0.0365
1022	141.91	114.25	141.85	141.85	139.36	-0.1949	-0.0004	-0.0004	-0.0180

Tabla 32. Comparación de modelos reológicos Lechada 1P (T=80°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	17.07	18.01	6.55	10.48	18.01	0.0553	-0.6160	-0.3858	0.0553
102	25.61	26.79	12.88	15.92	23.99	0.0462	-0.4972	-0.3782	-0.0634
170	33.08	35.87	21.18	23.35	31.65	0.0845	-0.3597	-0.2943	-0.0432
341	49.08	53.37	41.73	42.48	49.95	0.0875	-0.1497	-0.1346	0.0178
511	61.89	67.23	61.89	61.89	67.27	0.0862	0.0000	0.0000	0.0869
1022	121.64	112.14	121.59	121.59	116.28	-0.1794	-0.0004	-0.0004	-0.0441

Tabla 33. Comparación de modelos reológicos Lechada 2P (T=50°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	35.21	39.03	79.01	81.21	35.45	0.1085	1.2438	1.3064	0.0068
102	57.62	58.05	95.48	96.82	57.78	0.0074	0.6571	0.6804	0.0028
170	73.62	77.73	109.79	110.57	77.66	0.0558	0.4913	0.5019	0.0549
341	120.57	115.64	132.79	132.99	112.31	-0.0409	0.1013	0.1030	-0.0685
511	148.31	145.65	148.31	148.31	137.87	-0.0179	0.0000	0.0000	-0.0704
1022	179.26	216.26	179.24	179.24	194.37	0.2064	-0.0001	-0.0001	0.0843

Tabla 34. Comparación de modelos reológicos Lechada 2P (T=60°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	29.88	32.45	56.70	59.41	29.62	0.0862	0.8976	0.9883	-0.0087
102	46.95	48.27	72.62	74.33	48.35	0.0281	0.5468	0.5832	0.0298
170	65.09	64.63	87.16	88.18	65.75	-0.0070	0.3390	0.3547	0.0101
341	98.16	96.16	11.75	112.02	96.99	-0.0204	0.1384	0.1412	-0.0119
511	129.11	121.11	129.11	129.11	120.58	-0.0619	0.0000	0.0000	-0.0661
1022	165.39	179.83	165.37	165.37	173.80	0.0873	-0.0001	-0.0001	0.0508

Tabla 35. Comparación de modelos reológicos Lechada 2P (T=70°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	25.61	27.77	32.61	36.49	25.67	0.0842	0.2734	0.4250	0.0025
102	39.48	41.30	46.44	49.04	39.70	0.0461	0.1763	0.2421	0.0055
170	54.42	55.30	60.26	61.89	53.95	0.0161	0.1073	0.1373	-0.0087
341	80.03	82.27	85.94	86.41	81.15	0.0280	0.0739	0.0797	0.0140
511	105.63	103.62	105.63	105.63	102.58	-0.0190	0.0000	0.0000	-0.0288
1022	150.45	153.86	150.42	150.42	152.88	0.0226	-0.0002	-0.0002	0.0161

Tabla 36. Comparación de modelos reológicos Lechada 2P (T=80°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	22.41	24.26	25.24	28.52	22.75	0.0825	0.1264	0.2729	0.0153
102	34.14	36.08	36.95	39.18	33.50	0.0568	0.0824	0.1476	-0.0188
170	44.81	48.31	48.94	50.35	45.14	0.0781	0.0921	0.1237	0.0073
341	68.29	71.87	71.76	72.17	68.46	0.0525	0.0508	0.0568	0.0025
511	89.63	90.53	89.63	89.63	87.50	0.0100	0.0000	0.0000	-0.0238
1022	131.24	134.41	131.21	131.21	133.64	0.0242	-0.0002	-0.0002	0.0183

Tabla 37. Comparación de modelos reológicos Lechada 3P (T=50°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	41.61	42.98	67.23	71.04	41.21	0.0329	0.6157	0.7073	-0.0097
102	61.89	63.93	86.02	88.43	63.77	0.0329	0.3900	0.4288	0.0303
170	83.23	85.59	103.16	104.60	84.13	0.0284	0.2395	0.2568	0.0108
341	122.71	127.35	132.14	132.52	119.64	0.0378	0.0768	0.0799	-0.0250
511	152.58	160.40	152.58	152.58	145.78	0.0512	0.0000	0.0000	-0.0446
1022	195.26	238.15	195.23	195.23	203.24	0.2197	-0.0001	-0.0002	0.0409

Tabla 38. Comparación de modelos reológicos Lechada 3P (T=60°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	34.14	35.74	42.55	46.98	33.72	0.0469	0.2463	0.3761	-0.0122
102	49.08	53.16	59.41	62.35	50.67	0.0830	0.2105	0.2703	0.0323
170	68.29	71.17	75.99	77.81	67.77	0.0422	0.1127	0.1394	-0.0076
341	100.30	105.89	106.25	106.77	100.10	0.0558	0.0594	0.0645	-0.0019
511	129.11	133.38	129.11	129.11	125.34	0.0330	0.0000	0.0000	-0.0292
1022	180.32	198.03	180.29	180.28	183.91	0.0982	-0.0002	-0.0002	0.0199

Tabla 39. Comparación de modelos reológicos Lechada 3P (T=70°C).

Vel. Corte (seg ⁻¹)	τ Medido lb/100p ²	τ M.P. lb/100p ²	τ L.P. lb/100p ²	τ H.B. lb/100p ²	τ R.S. lb/100p ²	Error Rel. M.P. (%)	Error Rel. L.P. (%)	Error Rel. H.B. (%)	Error Rel. R.S. (%)
51	29.88	30.58	26.55	31.20	29.50	0.0234	-0.1113	0.0443	-0.0126
102	42.68	45.48	40.22	43.44	43.79	0.0656	-0.0575	0.0177	0.0261
170	58.69	60.90	54.63	56.70	58.41	0.0376	-0.0692	-0.0340	-0.0048
341	88.56	90.60	82.90	83.51	86.27	0.0231	-0.0640	-0.0571	-0.0259
511	105.63	114.11	105.63	105.63	108.14	0.0803	0.0000	0.0000	0.0238
1022	160.05	169.43	160.01	160.01	159.17	0.0586	-0.0002	-0.0002	-0.0055

Tabla 40. Comparación de modelos reológicos Lechada 3P (T=80°C)

Vel. Corte	τ Medido	τ M.P.	τ L.P.	τ H.B.	τ R.S.	Error Rel. M.P.	Error Rel. L.P.	Error Rel. H.B.	Error Rel. R.S.
(seg ⁻¹)	lb/100p ²	lb/100p ²	lb/100p ²	lb/100p ²	lb/100p ²	(%)	(%)	(%)	(%)
51	25.61	26.71	27.58	31.28	25.91	0.0430	0.0771	0.2214	0.0118
102	38.41	39.73	40.14	42.64	37.89	0.0344	0.0451	0.1102	-0.0135
170	50.15	53.20	52.93	54.51	50.52	0.0608	0.0554	0.0870	0.0073
341	75.76	79.15	77.15	77.60	75.19	0.0448	0.0183	0.0243	-0.0075
511	96.03	99.69	96.03	96.03	94.92	0.0381	0.0000	0.0000	-0.0116
1022	139.78	148.02	139.75	139.75	141.72	0.0589	-0.0002	-0.0002	0.0139

De las Tablas anteriores puede verse que los cálculos realizados utilizando la ecuación del modelo propuesto ofrecen resultados aproximados en cuanto a las predicciones de esfuerzo cortante que los determinados empleando el modelo de Robertson - Stiff. De las 72 lecturas registradas, tan sólo en un 20% resultó superior el modelo propuesto. Tal precisión resulta pobre, sin embargo, constituye un buen intento en la predicción de los esfuerzos de corte de las lechadas de cemento.

Otra ventaja importante del nuevo modelo resulta de predecir esfuerzos de corte dentro del rango de temperatura de 50 a 80°C (de acuerdo a las pruebas realizadas en este trabajo) tan solo con tener datos de temperatura y contenido de aditivos controlador de filtrado y dispersante de la lechada en estudio, es decir, no requiere el uso de viscosímetro rotacional que proporcione datos de reología y un proceso de cálculo complejo como lo representa el modelo de Robertson - Stiff.

Con relación a los otros modelos comparados, Ley de Potencias y Herschel - Bulkley, es notoria la mayor precisión que ofrece el modelo propuesto dentro de los rangos de temperatura y velocidades de corte experimentado. A continuación se muestran dos gráficas donde se aprecia esquemáticamente lo anteriormente expresado.

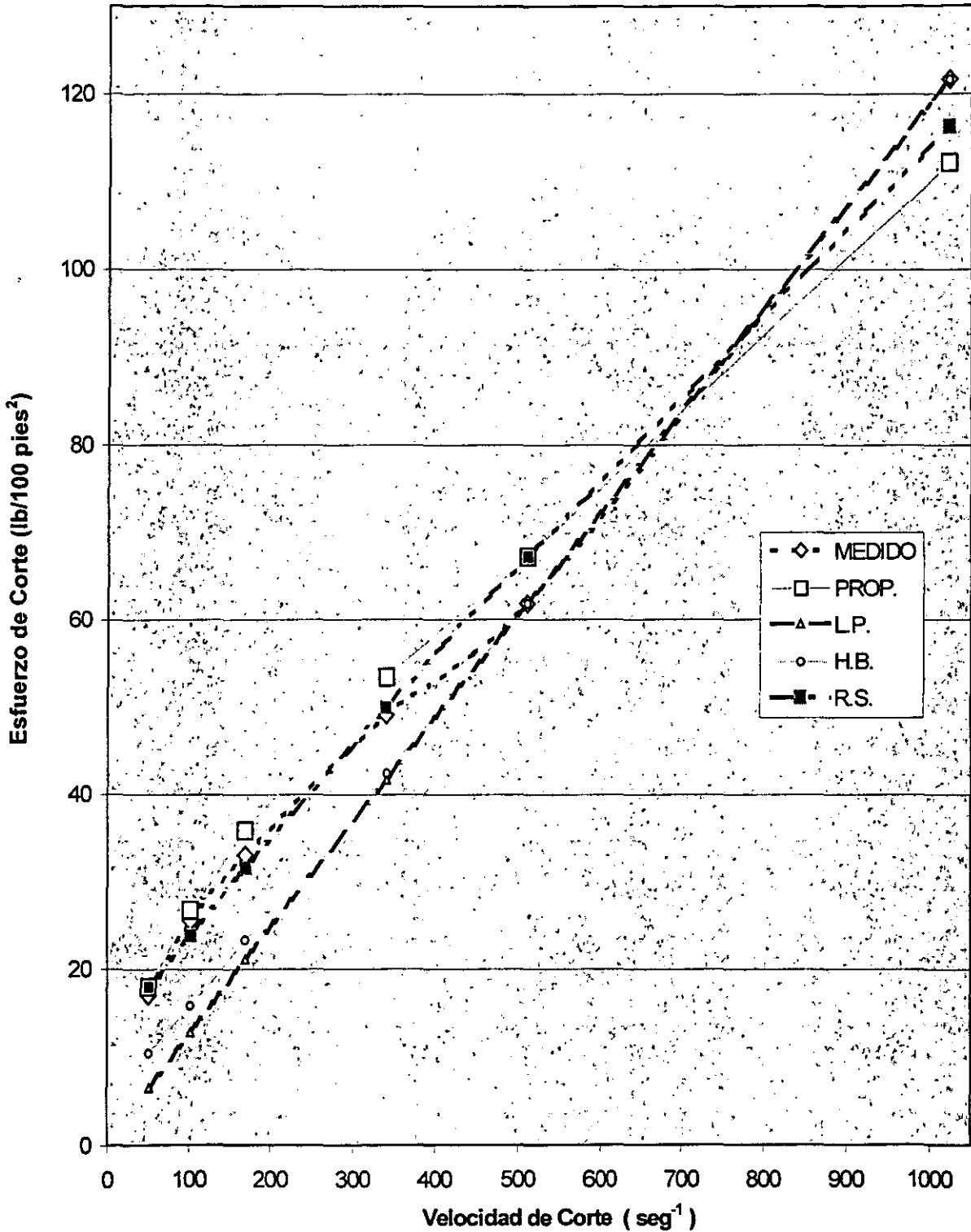


Fig. 33 Comparación de modelos reológicos.
Lechada 1P (T=30 °C)

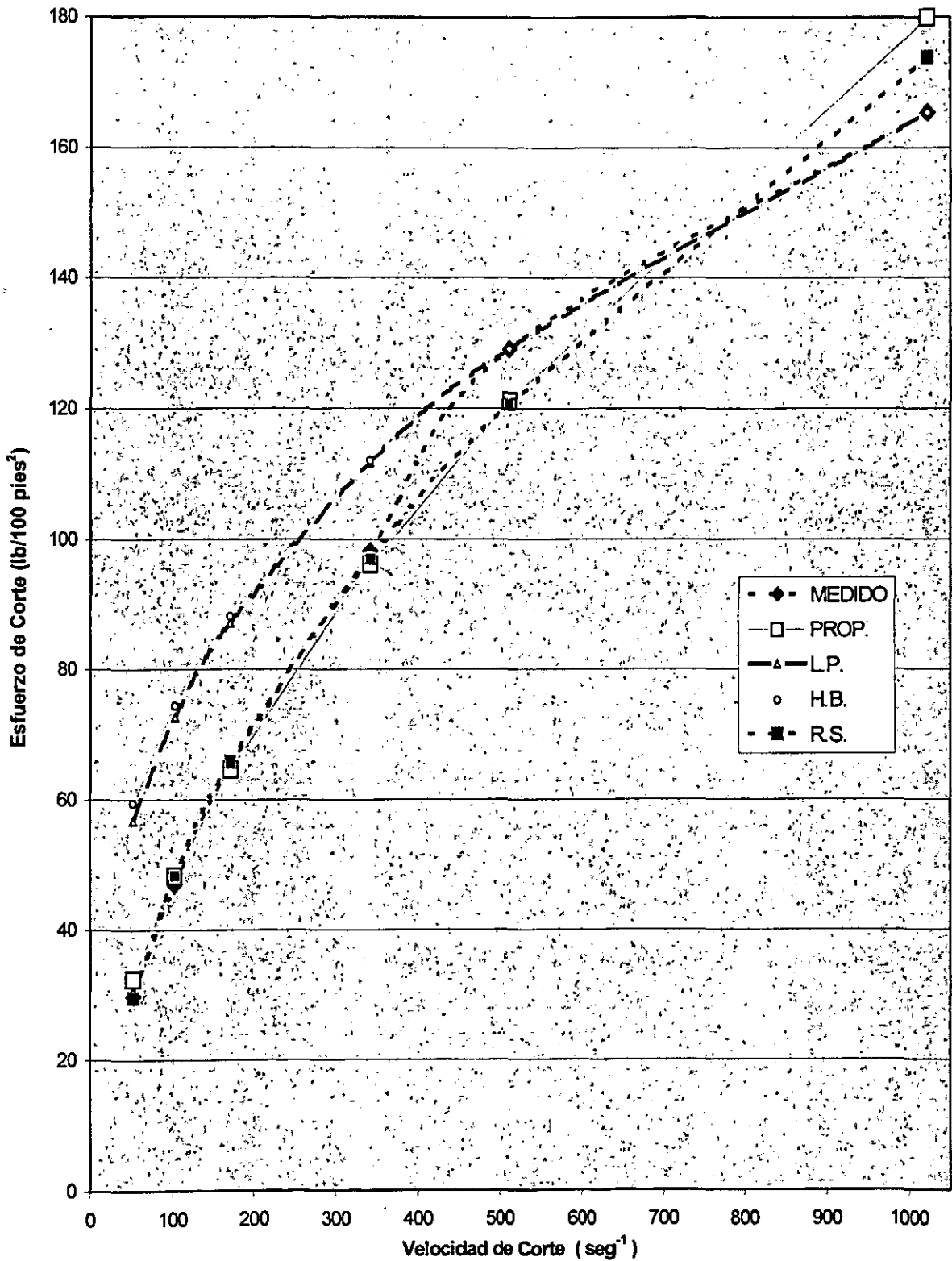


Fig. 34 Comparación de modelos reológicos.
Lechada 2P (T=60 °C)

Observando la ecuación (6), es posible realizar una simplificación de la misma, esto es, considerando lo siguiente:

$$a_2 = 1.0$$

$$a_4 = -1.0$$

$$a_5 = 1.0$$

De donde, aplicando la aproximación citada, se puede llegar a la ecuación simplificada para el modelo propuesto:

$$\tau = \frac{475.872 F}{T D^{-0.0664409}} \gamma^{0.569961} \quad (11)$$

Esta expresión fue aplicada nuevamente en la validación del modelo para las lechadas 1P, 2P y 3P observándose una mejoría considerable en la predicción del esfuerzo de corte. De las 72 estimaciones realizadas, en 21 de ellas se encontraron valores más cercanos a los esfuerzos de corte medidos, obteniéndose una eficiencia del 29%; lo cuál supera al 20% logrado originalmente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES.

1.- Se desarrolló un modelo matemático para la caracterización reológica de lechadas a base de cemento específicas, en donde se incluye el efecto de la temperatura y la concentración de aditivos, a saber : controlador de filtrado y dispersante . Dicho modelo aplicable dentro de los rangos de temperatura y velocidades de corte experimentados .

2.- Se determinaron límites máximos de concentración de aditivos que permitieran el manejo de buenas lechadas, sobre todo, libres de fenómenos de sedimentación. Incluso, el empleo de varias moliendas de cemento sirvió para destacar el hecho de que la tendencia en la variación de los esfuerzos de corte de las lechadas se mantuvo, aún variando dicha molienda.

3.- La precisión del modelo propuesto resulta similar a la correspondiente del modelo de Robertson y Stiff, destacando el hecho de que en el 20% de las pruebas, las predicciones de los esfuerzos de corte realizadas con el primero dieron resultados más cercanos a los esfuerzos de corte medidos. Sin embargo, aplicando la simplificación presentada en la ecuación (11), los resultados mejoraron a un 29% del total de pruebas llevadas a cabo en la validación del modelo propuesto.

4.- Con relación a lechadas a base de cemento, no se requiere del conocimiento de las propiedades reológicas para velocidades de corte superiores a 300 rpm, ya que nunca estarán expuestas en el pozo a tales velocidades en las operaciones de cementación.

5.- Se observó el comportamiento en donde la disminución de propiedades reológicas contrasta con el incremento de temperatura, al ir

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

aumentando la cantidad de sólidos en la muestra; encontrándose que este fenómeno es atenuado por el dispersante.

RECOMENDACIONES.

1.- Al personal que realice experimentaciones sobre lechadas de cemento deberá tener cuidado de emplear la misma agua que comúnmente se emplea en las operaciones de cementación.

2.- La metodología empleada en el desarrollo de este modelo es necesario extenderla de 80 a 120 ° C.

3.- Es importante que toda experimentación esté basada en lechadas estables, esto es, que no presenten fenómenos de sedimentación.

4.- La calidad del cemento empleado en las pruebas deberá cumplir con lo estipulado en la Norma PEMEX IMP 2/93.

NOMENCLATURA.

A	= Área	[L ²]
	Constante reológica del modelo de Robertson y Stiff.	[F T ^B /L ²]
a ₁	= Constante reológica del modelo propuesto.	[F T ^{a3} /L ²]
a ₂	= Factor de corrección de la velocidad de corte del modelo propuesto.	[1/T]
a ₃ , a ₄ , a ₅	= Constantes reológicas del modelo propuesto.	[Adim.]
a ₆		
B	= Constante reológica del modelo de Robertson y Stiff.	[Adim.]
b	= Ancho de las placas paralelas.	[L]
C	= Factor de corrección de la velocidad de corte en el Modelo de Robertson y Stiff.	[1/T]
D	= Contenido de aditivo dispersante en la lechada.	[%]
d	= Separación de las placas paralelas.	[L]
F	= Contenido de aditivo controlador de filtrado en la lechada.	[%]
g _c	= Constante gravitacional.	[M L / FT ²]
K	= Índice de consistencia.	[F T ⁿ / L ²]
L	= Longitud de la placa.	[L]
N	= Velocidad de rotación de la camisa.	[rpm]
n	= Índice de comportamiento de flujo.	[Adim.]
T	= Temperatura.	[°C]
t	= Tiempo.	[T]
R	= Longitud media de separación de las placas.	[L]
v	= Velocidad media de flujo.	[L/T]
q	= Gasto volumétrico.	[L ³ / T]
x	= Longitud medida de la pared al centro de la línea de flujo.	[L]
ΔP	= Caída de presión.	[F/L ²]

NOMENCLATURA

γ	=	Velocidad de corte.	[1/T]
μ_p, V_p	=	Viscosidad plástica.	[M/LT]
θ	=	Lectura Fann, deflexión del resorte.	[grados]
θ_0, Gel_0	=	Valor de gelatinosidad inicial.	[F/L ²]
θ_{600}	=	Lectura Fann a 600 rpm.	[grados]
θ_{300}	=	Lectura Fann a 300 rpm.	[grados]
τ	=	Esfuerzo cortante.	[F/L ²]
τ_0, τ_y, P_c	=	Esfuerzo de cedencia.	[F/L ²]
τ_{600}	=	Esfuerzo de corte medido a 600 rpm.	[F/L ²]
τ_{300}	=	Esfuerzo de corte medido a 300 rpm.	[F/L ²]

BIBLIOGRAFÍA.

1. Nelson E.B., et al.: Well Cementing, Schlumberger Educational Services. Houston, Texas. (1990).
2. Howard, G.C. and Clark, J.B. : " Factors to be considered in obtaining proper cementing of casing", Drill & Prod. Prac., API (1948) **257**.
3. Ravi, K.M. y D.L. Sutton.: "New Rheological Correlation for Cement Slurries as a Function of Temperature", artículo SPE 20449, presentado en la "65th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers " celebrado en New Orleans, LA, Septiembre 23-26, 1990.
4. Clark, P.E. and Shaughnessy III, R.J. : " Rheological Evaluation of Dense Suspensions : Simulation of a Fresh Cement Paste ", artículo SPE 18526, presentado en el "SPE Eastern Regional Meeting" celebrado en Charleston, WV, Noviembre 1 - 4, 1988.
5. Clark, C.R., and Carter, L.G. : " Mud Displacement with Cement Slurries, " Journal of Petroleum Technology (July 1973) 775 -783.
6. Melton, L.L. and Saunders, C.D. : "Rheological Measurements of Non-Newtonian fluids ", Trans., AIME (1957) **210**, 196.
7. Slagle, K. A. : " Rheological Design of Cementing Operations, " Journal of Petroleum Technology " (March, 1962) 323 - 328 ; Trans., AIME, **255**.
8. McLean, R.H., Manry, C.W and Whitaker, W.W. : " Displacement Mechanics in Primary Cementing, " Journal of Petroleum Technology (Feb, 1967) 251 - 260; Trans., AIME, **240**.

9. Robertson, R.E. y Stiff, H.A., Jr., : " An Improved Mathematical Model for Relating Shear Stress to Shear Rate in Drilling Fluids and Cement Slurries", Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 16, No. 1, Feb. 1976.
10. Zamora; M. y Bleier, R. : " Prediction of Drilling Mud Rheology Using a Simplified Herschel - Bulkley Model, " J. Pressure Vessel Technology. (Agosto, 1977) 485 - 490.
11. Beirute, R.M., y Flumerfelt, R.W., : " An Evaluation of the Robertson - Stiff Model Describing Rheological Properties of Drilling Fluids and Cement Slurries: Soc. of Pet. Eng. Journal (Abril, 1997), Vol. 17, No. 2, p. 97.
12. Gucuyener, I. H. : " A Rheological Model for Drilling Fluids and Cement Slurries" , artículo SPE 11487, presentado en la "Middle East Oil Technical Conference of SPE", celebrado en Manama, Bahrain, Marzo 14 - 17, 1983, 389 - 396.
13. León , J.G. : Fundamentos de reología no - newtoniana y viscosimetría capilar y rotacional, Apuntes, Febrero 1992.
14. Mannheimer, R.J. : "Effect of slip on flow properties of cement slurries can flaw resistance calculations", Oil & Gas Journal, Diciembre . 5, 1983, 75.
15. Lummus, J.L. and Azar J.J. : "Drilling Fluids Optimization: A practical field approach". Gulf Publishing Company, 1981.
16. Bannister, C.E. : "Rheological Evaluation of Cement Slurries: Methods and Models", artículo SPE 9284, presentado en la "55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME", celebrado en Dallas, TX., Septiembre 21-24, 1980.

17. Denis, J.H., y Guillot D.J.: "Prediction of Cement Slurry Laminar Pressure Drops by Rotational Viscometry", artículo SPE 16137, presentado en la " 1987 SPE / IADC Drilling Conference", celebrada en New Orleans, LA, Marzo 15 -18.
18. Shah, S.N., y Sutton D.I.: "New Friction Correlations for Cements from Pipe and Rotational Viscometer Data", artículo SPE 19539 presentado en la "1989 Annual Fall Technical Conference and Exhibition", celebrada en San Antonio, Oct. 8-11, 1989.
19. Bourgoyne, A.T. Jr., Chenevert, M.E., Millheim, K.K. y Young, F.S. Jr.: Applied Drilling Engineering ,SPE Textbook Series, Vol. 2, 1991.
20. American Petroleum Institute: API RP 10B, Sixteenth Edition, Abril 1969.
21. IMSL MATH / LIBRARY. : "Fortran Subroutines for Mathematical Applications" Softcover Editions 1991.
22. Craff, B.C, Holden, W.R. y Graves Jr. E.D. : Well Design Drilling and Production, Prentice Hall, New Jersey (1983).

```

program cemento_no_lineal
  use numerical_libraries
c
c Este programa encuentra los valores de los parámetros
c a,b,c y d en la ecuación:
c
c  $\tau = a(1) \cdot (\text{gama} + a(2))^{a(3)} \cdot T^{a(4)} \cdot F^{a(5)} \cdot D^{a(6)}$ 
c
c mediante un ajuste no lineal de mínimos cuadrados
c
  implicit double precision(a-h,o-z)
  integer error
  character *40 archivo
  dimension tau(1000),gama(1000),T(1000),F(1000),D(1000),
1    a(6),a0(6),ascale(6),fscale(1000),iparam(6),rparam(7),
2    fvec(1000),fjac(1000,6)
  common gama,T,F,D,tau
  external fobj
  data ascale/6*1.0d0/,fscale/1000*1.0d0/
c
c lectura de datos
c gama es la velocidad de corte,s-1)
c T es la temperatura, en C
c F es un aditivo para controlar el filtrado, en %
c D es un aditivo dispersante, en %
c tau es el esfuerzo de corte, en lbf/(100 pies2)
c
  print *,'Nombre del archivo de datos?'
  read *,archivo
  open(78,file=archivo)
  np=0
  read(78,*,iostat=error)t1,t2,t3,t4,t5
  do 10 while(error.eq.0)
    np=np+1
    D(np)=t5
    gama(np)=1.703d0*t4
    T(np)=t2
    F(np)=t3
    tau(np)=1.067d0*t1
10 read(78,*,iostat=error)t1,t2,t3,t4,t5
c
c ajuste por mínimos cuadrados mediante la subrutina DUNLSF,
c incluida en la MATH LIBRARY de IMSL
c
  print *,'Estimaciones iniciales para los coeficientes?'
  read *,a0
  iparam(1)=0

```

```

    call dunlsf(fobj,np,6,a0,ascale,fscale,iparam,rparam,a,fvec,
1      fjac,1000)
print '(//,6x,"a(1)=",g14.6/,
1      6x,"a(2)=",g14.6/,
2      6x,"a(3)=",g14.6/,
3      6x,"a(4)=",g14.6/,
4      6x,"a(5)=",g14.6/,
4      6x,"a(6)=",g14.6,//)',a
print '(10x,"gama",10x,"T",11x,"F",12x,"D",9x,"tau",8x,
1      "tau calc.",6x,"error relativo",6x,"residuales")'
do 30 i=1,np
    taucalc=a(1)*(gama(i)+a(2))**a(3)*T(i)**a(4)*F(i)**a(5)*
1      D(i)**a(6)
30 print '(6x,f10.3,3x,f8.2,3x,f8.2,3x,f10.3,3x,f10.3,3x,f10.3,7x,
1      f10.3,10x,g14.5)',gama(i),T(i),F(i),D(i),tau(i),taucalc,
2      (tau(i)-taucalc)/tau(i),fvec(i)
    stop
end
subroutine fobj(np,n,a,ff)
implicit double precision(a-h,o-z)
dimension ff(np),a(n)
c
c  definición de la función por minimizar
c
    common gamma(1000),T(1000),F(1000),D(1000),tau(1000)
do 10 i=1,np
10 ff(i)=a(1)*(gamma(i)+a(2))**a(3)*T(i)**a(4)*F(i)**a(5)*
1      D(i)**a(6)-tau(i)
return
end

```

Nombre del archivo de datos?

Estimaciones iniciales para los coeficientes?

a(1)= 475.872
a(2)= -0.337352
a(3)= 0.569961
a(4)= -1.01184
a(5)= 0.909793
a(6)= -0.664409E-01

gama	T	F	D	tau	tau calc.	error relativo	residuales
51.090	50.00	0.25	0.150	26.675	27.380	-0.026	0.70495
102.180	50.00	0.25	0.150	35.211	40.722	-0.157	5.5110
170.300	50.00	0.25	0.150	46.948	54.526	-0.161	7.5778
340.600	50.00	0.25	0.150	69.355	80.989	-0.168	11.634
510.900	50.00	0.25	0.150	85.360	102.063	-0.196	16.703
51.090	60.00	0.25	0.150	25.608	22.767	0.111	-2.8406
102.180	60.00	0.25	0.150	34.144	33.862	0.008	-0.28218
170.300	60.00	0.25	0.150	43.747	45.340	-0.036	1.5932
340.600	60.00	0.25	0.150	64.020	67.345	-0.052	3.3248
510.900	60.00	0.25	0.150	80.025	84.869	-0.061	4.8444
51.090	70.00	0.25	0.150	24.541	19.479	0.206	-5.0617
102.180	70.00	0.25	0.150	33.077	28.971	0.124	-4.1055
170.300	70.00	0.25	0.150	41.613	38.792	0.068	-2.8209
340.600	70.00	0.25	0.150	60.819	57.619	0.053	-3.2002
510.900	70.00	0.25	0.150	77.891	72.613	0.068	-5.2785
51.090	80.00	0.25	0.150	23.474	17.017	0.275	-6.4565
102.180	80.00	0.25	0.150	32.010	25.310	0.209	-6.7000
170.300	80.00	0.25	0.150	40.546	33.889	0.164	-6.6565
340.600	80.00	0.25	0.150	58.685	50.337	0.142	-8.3482
510.900	80.00	0.25	0.150	74.690	63.436	0.151	-11.254
51.090	50.00	0.30	0.150	32.010	32.320	-0.010	0.30999
102.180	50.00	0.30	0.150	46.948	48.069	-0.024	1.1213
170.300	50.00	0.30	0.150	64.020	64.364	-0.005	0.34369
340.600	50.00	0.30	0.150	99.231	95.601	0.037	-3.6301
510.900	50.00	0.30	0.150	125.906	120.478	0.043	-5.4277
51.090	60.00	0.30	0.150	30.943	26.875	0.131	-4.0678
102.180	60.00	0.30	0.150	42.680	39.971	0.063	-2.7086
170.300	60.00	0.30	0.150	55.484	53.521	0.035	-1.9633
340.600	60.00	0.30	0.150	82.159	79.496	0.032	-2.6635
510.900	60.00	0.30	0.150	104.566	100.182	0.042	-4.3840

51.090	70.00	0.30	0.150	28.809	22.994	0.202	-5.8151
102.180	70.00	0.30	0.150	37.345	34.199	0.084	-3.1463
170.300	70.00	0.30	0.150	48.015	45.791	0.046	-2.2238
340.600	70.00	0.30	0.150	72.556	68.015	0.063	-4.5413
510.900	70.00	0.30	0.150	90.695	85.714	0.055	-4.9813
51.090	80.00	0.30	0.150	24.541	20.088	0.181	-4.4531
102.180	80.00	0.30	0.150	33.077	29.877	0.097	-3.2005
170.300	80.00	0.30	0.150	41.613	40.004	0.039	-1.6090
340.600	80.00	0.30	0.150	58.685	59.419	-0.013	0.73384
510.900	80.00	0.30	0.150	71.489	74.881	-0.047	3.3919
51.090	50.00	0.35	0.150	34.144	37.186	-0.089	3.0420
102.180	50.00	0.35	0.150	48.015	55.306	-0.152	7.2914
170.300	50.00	0.35	0.150	65.087	74.054	-0.138	8.9670
340.600	50.00	0.35	0.150	101.365	109.994	-0.085	8.6292
510.900	50.00	0.35	0.150	132.308	138.617	-0.048	6.3090
51.090	60.00	0.35	0.150	33.077	30.921	0.065	-2.1556
102.180	60.00	0.35	0.150	44.814	45.989	-0.026	1.1753
170.300	60.00	0.35	0.150	58.685	61.579	-0.049	2.8936
340.600	60.00	0.35	0.150	89.628	91.464	-0.020	1.8361
510.900	60.00	0.35	0.150	113.102	115.265	-0.019	2.1630
51.090	70.00	0.35	0.150	32.010	26.456	0.174	-5.5543
102.180	70.00	0.35	0.150	41.613	39.347	0.054	-2.2655
170.300	70.00	0.35	0.150	53.350	52.685	0.012	-0.66467
340.600	70.00	0.35	0.150	78.958	78.255	0.009	-0.70325
510.900	70.00	0.35	0.150	99.231	98.618	0.006	-0.61265
51.090	80.00	0.35	0.150	30.943	23.112	0.253	-7.8308
102.180	80.00	0.35	0.150	40.546	34.375	0.152	-6.1714
170.300	80.00	0.35	0.150	51.216	46.027	0.101	-5.1892
340.600	80.00	0.35	0.150	74.690	68.365	0.085	-6.3253
510.900	80.00	0.35	0.150	91.762	86.155	0.061	-5.6073
51.090	50.00	0.40	0.150	37.345	41.989	-0.124	4.6444
102.180	50.00	0.40	0.150	55.484	62.451	-0.126	6.9666
170.300	50.00	0.40	0.150	74.690	83.620	-0.120	8.9298
340.600	50.00	0.40	0.150	113.102	124.202	-0.098	11.100
510.900	50.00	0.40	0.150	138.710	156.523	-0.128	17.813
51.090	60.00	0.40	0.150	36.278	34.916	0.038	-1.3623
102.180	60.00	0.40	0.150	54.417	51.930	0.046	-2.4871
170.300	60.00	0.40	0.150	72.556	69.533	0.042	-3.0231
340.600	60.00	0.40	0.150	109.901	103.279	0.060	-6.6222
510.900	60.00	0.40	0.150	134.442	130.154	0.032	-4.2878
51.090	70.00	0.40	0.150	30.943	29.873	0.035	-1.0699
102.180	70.00	0.40	0.150	42.680	44.430	-0.041	1.7501
170.300	70.00	0.40	0.150	54.417	59.491	-0.093	5.0739

340.600	70.00	0.40	0.150	76.824	88.363	-0.150	11.539
510.900	70.00	0.40	0.150	94.963	111.357	-0.173	16.394
51.090	80.00	0.40	0.150	26.675	26.098	0.022	-0.57732
102.180	80.00	0.40	0.150	38.412	38.815	-0.010	0.40291
170.300	80.00	0.40	0.150	50.149	51.972	-0.036	1.8233
340.600	80.00	0.40	0.150	72.556	77.196	-0.064	4.6396
510.900	80.00	0.40	0.150	90.695	97.284	-0.073	6.5886
51.090	50.00	0.45	0.150	37.345	46.739	-0.252	9.3938
102.180	50.00	0.45	0.150	54.417	69.514	-0.277	15.097
170.300	50.00	0.45	0.150	73.623	93.078	-0.264	19.455
340.600	50.00	0.45	0.150	115.236	138.251	-0.200	23.015
510.900	50.00	0.45	0.150	149.380	174.227	-0.166	24.847
51.090	60.00	0.45	0.150	36.278	38.865	-0.071	2.5870
102.180	60.00	0.45	0.150	53.350	57.804	-0.083	4.4537
170.300	60.00	0.45	0.150	71.489	77.398	-0.083	5.9088
340.600	60.00	0.45	0.150	110.968	114.961	-0.036	3.9927
510.900	60.00	0.45	0.150	142.978	144.876	-0.013	1.8980
51.090	70.00	0.45	0.150	33.077	33.252	-0.005	0.17508
102.180	70.00	0.45	0.150	49.082	49.456	-0.008	0.37362
170.300	70.00	0.45	0.150	64.020	66.220	-0.034	2.1999
340.600	70.00	0.45	0.150	96.030	98.358	-0.024	2.3280
510.900	70.00	0.45	0.150	120.571	123.953	-0.028	3.3819
51.090	80.00	0.45	0.150	28.809	29.050	-0.008	0.24059
102.180	80.00	0.45	0.150	43.747	43.205	0.012	-0.54173
170.300	80.00	0.45	0.150	56.551	57.851	-0.023	1.2998
340.600	80.00	0.45	0.150	84.293	85.927	-0.019	1.6342
510.900	80.00	0.45	0.150	101.365	108.287	-0.068	6.9223
51.090	50.00	0.25	0.200	23.474	26.862	-0.144	3.3876
102.180	50.00	0.25	0.200	37.345	39.951	-0.070	2.6061
170.300	50.00	0.25	0.200	52.283	53.494	-0.023	1.2105
340.600	50.00	0.25	0.200	77.891	79.455	-0.020	1.5642
510.900	50.00	0.25	0.200	96.030	100.131	-0.043	4.1012
51.090	60.00	0.25	0.200	21.340	22.336	-0.047	0.99637
102.180	60.00	0.25	0.200	33.077	33.221	-0.004	0.14374
170.300	60.00	0.25	0.200	45.881	44.482	0.030	-1.3992
340.600	60.00	0.25	0.200	68.288	66.070	0.032	-2.2182
510.900	60.00	0.25	0.200	84.293	83.263	0.012	-1.0303
51.090	70.00	0.25	0.200	19.206	19.111	0.005	-0.95468E-01
102.180	70.00	0.25	0.200	25.608	28.423	-0.110	2.8150
170.300	70.00	0.25	0.200	42.680	38.058	0.108	-4.6223
340.600	70.00	0.25	0.200	62.953	56.528	0.102	-6.4250
510.900	70.00	0.25	0.200	76.824	71.238	0.073	-5.5862
51.090	80.00	0.25	0.200	17.072	16.695	0.022	-0.37671

102.180	80.00	0.25	0.200	27.742	24.831	0.105	-2.9112
170.300	80.00	0.25	0.200	37.345	33.248	0.110	-4.0971
340.600	80.00	0.25	0.200	53.350	49.384	0.074	-3.9662
510.900	80.00	0.25	0.200	64.020	62.235	0.028	-1.7854
51.090	50.00	0.30	0.200	33.077	31.708	0.041	-1.3689
102.180	50.00	0.30	0.200	51.216	47.159	0.079	-4.0567
170.300	50.00	0.30	0.200	68.288	63.145	0.075	-5.1429
340.600	50.00	0.30	0.200	101.365	93.791	0.075	-7.5741
510.900	50.00	0.30	0.200	128.040	118.197	0.077	-9.8426
51.090	60.00	0.30	0.200	29.876	26.366	0.117	-3.5096
102.180	60.00	0.30	0.200	45.881	39.215	0.145	-6.6664
170.300	60.00	0.30	0.200	60.819	52.507	0.137	-8.3116
340.600	60.00	0.30	0.200	88.561	77.991	0.119	-10.570
510.900	60.00	0.30	0.200	109.901	98.285	0.106	-11.616
51.090	70.00	0.30	0.200	25.608	22.559	0.119	-3.0494
102.180	70.00	0.30	0.200	38.412	33.551	0.127	-4.8608
170.300	70.00	0.30	0.200	51.216	44.924	0.123	-6.2917
340.600	70.00	0.30	0.200	73.623	66.727	0.094	-6.8959
510.900	70.00	0.30	0.200	89.628	84.091	0.062	-5.5371
51.090	80.00	0.30	0.200	19.206	19.708	-0.026	0.50154
102.180	80.00	0.30	0.200	32.010	29.311	0.084	-2.6991
170.300	80.00	0.30	0.200	43.747	39.247	0.103	-4.5004
340.600	80.00	0.30	0.200	62.953	58.294	0.074	-4.6591
510.900	80.00	0.30	0.200	74.690	73.463	0.016	-1.2267
51.090	50.00	0.35	0.200	34.144	36.482	-0.068	2.3379
102.180	50.00	0.35	0.200	50.149	54.259	-0.082	4.1104
170.300	50.00	0.35	0.200	68.288	72.652	-0.064	4.3640
340.600	50.00	0.35	0.200	105.633	107.912	-0.022	2.2787
510.900	50.00	0.35	0.200	133.375	135.993	-0.020	2.6177
51.090	60.00	0.35	0.200	27.742	30.336	-0.094	2.5940
102.180	60.00	0.35	0.200	40.546	45.119	-0.113	4.5726
170.300	60.00	0.35	0.200	53.350	60.413	-0.132	7.0627
340.600	60.00	0.35	0.200	83.226	89.732	-0.078	6.5064
510.900	60.00	0.35	0.200	104.566	113.083	-0.081	8.5168
51.090	70.00	0.35	0.200	23.474	25.955	-0.106	2.4809
102.180	70.00	0.35	0.200	34.144	38.603	-0.131	4.4585
170.300	70.00	0.35	0.200	43.747	51.688	-0.182	7.9409
340.600	70.00	0.35	0.200	66.154	76.773	-0.161	10.619
510.900	70.00	0.35	0.200	83.226	96.751	-0.163	13.525
51.090	80.00	0.35	0.200	20.273	22.675	-0.118	2.4016
102.180	80.00	0.35	0.200	29.876	33.724	-0.129	3.8478
170.300	80.00	0.35	0.200	39.479	45.155	-0.144	5.6764
340.600	80.00	0.35	0.200	57.618	67.070	-0.164	9.4524

510.900	80.00	0.35	0.200	72.556	84.524	-0.165	11.968
51.090	50.00	0.40	0.200	43.747	41.194	0.058	-2.5526
102.180	50.00	0.40	0.200	66.154	61.268	0.074	-4.8858
170.300	50.00	0.40	0.200	87.494	82.037	0.062	-5.4573
340.600	50.00	0.40	0.200	130.174	121.851	0.064	-8.3230
510.900	50.00	0.40	0.200	160.050	153.559	0.041	-6.4907
51.090	60.00	0.40	0.200	37.345	34.255	0.083	-3.0904
102.180	60.00	0.40	0.200	53.350	50.947	0.045	-2.4033
170.300	60.00	0.40	0.200	72.556	68.216	0.060	-4.3395
340.600	60.00	0.40	0.200	104.566	101.323	0.031	-3.2425
510.900	60.00	0.40	0.200	129.107	127.690	0.011	-1.4169
51.090	70.00	0.40	0.200	32.010	29.308	0.084	-2.7024
102.180	70.00	0.40	0.200	46.948	43.589	0.072	-3.3591
170.300	70.00	0.40	0.200	59.752	58.365	0.023	-1.3874
340.600	70.00	0.40	0.200	88.561	86.690	0.021	-1.8707
510.900	70.00	0.40	0.200	109.901	109.249	0.006	-0.65203
51.090	80.00	0.40	0.200	27.742	25.604	0.077	-2.1384
102.180	80.00	0.40	0.200	40.546	38.080	0.061	-2.4659
170.300	80.00	0.40	0.200	50.149	50.988	-0.017	0.83930
340.600	80.00	0.40	0.200	69.355	75.734	-0.092	6.3791
510.900	80.00	0.40	0.200	84.293	95.442	-0.132	11.149
51.090	50.00	0.45	0.200	49.082	45.854	0.066	-3.2281
102.180	50.00	0.45	0.200	72.556	68.198	0.060	-4.3577
170.300	50.00	0.45	0.200	94.963	91.316	0.038	-3.6471
340.600	50.00	0.45	0.200	145.112	135.634	0.065	-9.4784
510.900	50.00	0.45	0.200	181.390	170.928	0.058	-10.462
51.090	60.00	0.45	0.200	41.613	38.129	0.084	-3.4838
102.180	60.00	0.45	0.200	59.752	56.709	0.051	-3.0427
170.300	60.00	0.45	0.200	81.092	75.932	0.064	-5.1596
340.600	60.00	0.45	0.200	120.571	112.784	0.065	-7.7868
510.900	60.00	0.45	0.200	149.380	142.133	0.049	-7.2469
51.090	70.00	0.45	0.200	36.278	32.623	0.101	-3.6555
102.180	70.00	0.45	0.200	51.216	48.519	0.053	-2.6967
170.300	70.00	0.45	0.200	66.154	64.966	0.018	-1.1878
340.600	70.00	0.45	0.200	94.963	96.496	-0.016	1.5328
510.900	70.00	0.45	0.200	118.437	121.606	-0.027	3.1691
51.090	80.00	0.45	0.200	30.943	28.500	0.079	-2.4434
102.180	80.00	0.45	0.200	45.881	42.387	0.076	-3.4937
170.300	80.00	0.45	0.200	53.350	56.756	-0.064	3.4056
340.600	80.00	0.45	0.200	78.958	84.300	-0.068	5.3424
510.900	80.00	0.45	0.200	96.030	106.237	-0.106	10.207
51.090	50.00	0.25	0.250	21.340	26.466	-0.240	5.1263
102.180	50.00	0.25	0.250	32.010	39.363	-0.230	7.3531

170.300	50.00	0.25	0.250	42.680	52.706	-0.235	10.026
340.600	50.00	0.25	0.250	66.154	78.286	-0.183	12.132
510.900	50.00	0.25	0.250	83.226	98.658	-0.185	15.432
51.090	60.00	0.25	0.250	19.206	22.008	-0.146	2.8017
102.180	60.00	0.25	0.250	27.742	32.732	-0.180	4.9898
170.300	60.00	0.25	0.250	35.211	43.827	-0.245	8.6162
340.600	60.00	0.25	0.250	54.417	65.098	-0.196	10.681
510.900	60.00	0.25	0.250	68.288	82.037	-0.201	13.749
51.090	70.00	0.25	0.250	16.005	18.829	-0.176	2.8243
102.180	70.00	0.25	0.250	22.407	28.005	-0.250	5.5977
170.300	70.00	0.25	0.250	27.742	37.498	-0.352	9.7556
340.600	70.00	0.25	0.250	41.613	55.696	-0.338	14.083
510.900	70.00	0.25	0.250	54.417	70.189	-0.290	15.772
51.090	80.00	0.25	0.250	13.871	16.450	-0.186	2.5786
102.180	80.00	0.25	0.250	20.273	24.465	-0.207	4.1924
170.300	80.00	0.25	0.250	25.608	32.759	-0.279	7.1506
340.600	80.00	0.25	0.250	37.345	48.657	-0.303	11.312
510.900	80.00	0.25	0.250	48.015	61.319	-0.277	13.304
51.090	50.00	0.30	0.250	30.943	31.241	-0.010	0.29847
102.180	50.00	0.30	0.250	45.881	46.465	-0.013	0.58424
170.300	50.00	0.30	0.250	62.953	62.216	0.012	-0.73714
340.600	50.00	0.30	0.250	97.097	92.411	0.048	-4.6863
510.900	50.00	0.30	0.250	122.705	116.458	0.051	-6.2471
51.090	60.00	0.30	0.250	26.675	25.978	0.026	-0.69661
102.180	60.00	0.30	0.250	39.479	38.638	0.021	-0.84150
170.300	60.00	0.30	0.250	54.417	51.735	0.049	-2.6823
340.600	60.00	0.30	0.250	84.293	76.843	0.088	-7.4502
510.900	60.00	0.30	0.250	105.633	96.839	0.083	-8.7941
51.090	70.00	0.30	0.250	22.407	22.227	0.008	-0.18043
102.180	70.00	0.30	0.250	34.144	33.057	0.032	-1.0866
170.300	70.00	0.30	0.250	43.747	44.263	-0.012	0.51614
340.600	70.00	0.30	0.250	64.020	65.745	-0.027	1.7251
510.900	70.00	0.30	0.250	81.092	82.853	-0.022	1.7614
51.090	80.00	0.30	0.250	17.072	19.418	-0.137	2.3455
102.180	80.00	0.30	0.250	24.541	28.880	-0.177	4.3385
170.300	80.00	0.30	0.250	33.077	38.669	-0.169	5.5920
340.600	80.00	0.30	0.250	46.948	57.436	-0.223	10.488
510.900	80.00	0.30	0.250	58.685	72.382	-0.233	13.697
51.090	50.00	0.35	0.250	33.077	35.945	-0.087	2.8681
102.180	50.00	0.35	0.250	50.149	53.461	-0.066	3.3118
170.300	50.00	0.35	0.250	69.355	71.583	-0.032	2.2278
340.600	50.00	0.35	0.250	109.901	106.324	0.033	-3.5774
510.900	50.00	0.35	0.250	137.643	133.991	0.027	-3.6516

51.090	60.00	0.35	0.250	27.742	29.890	-0.077	2.1476
102.180	60.00	0.35	0.250	42.680	44.455	-0.042	1.7746
170.300	60.00	0.35	0.250	58.685	59.524	-0.014	0.83867
340.600	60.00	0.35	0.250	92.829	88.412	0.048	-4.4171
510.900	60.00	0.35	0.250	116.303	111.419	0.042	-4.8844
51.090	70.00	0.35	0.250	23.474	25.573	-0.089	2.0989
102.180	70.00	0.35	0.250	37.345	38.034	-0.018	0.68943
170.300	70.00	0.35	0.250	49.082	50.927	-0.038	1.8452
340.600	70.00	0.35	0.250	72.556	75.643	-0.043	3.0874
510.900	70.00	0.35	0.250	97.097	95.327	0.018	-1.7696
51.090	80.00	0.35	0.250	19.206	22.341	-0.163	3.1349
102.180	80.00	0.35	0.250	28.809	33.228	-0.153	4.4185
170.300	80.00	0.35	0.250	36.278	44.491	-0.226	8.2129
340.600	80.00	0.35	0.250	53.350	66.083	-0.239	12.733
510.900	80.00	0.35	0.250	65.087	83.280	-0.280	18.193
51.090	50.00	0.40	0.250	39.479	40.588	-0.028	1.1092
102.180	50.00	0.40	0.250	64.020	60.367	0.057	-3.6534
170.300	50.00	0.40	0.250	86.427	80.829	0.065	-5.5976
340.600	50.00	0.40	0.250	129.107	120.058	0.070	-9.0492
510.900	50.00	0.40	0.250	157.916	151.299	0.042	-6.6165
51.090	60.00	0.40	0.250	33.077	33.751	-0.020	0.67353
102.180	60.00	0.40	0.250	53.350	50.197	0.059	-3.1530
170.300	60.00	0.40	0.250	72.556	67.213	0.074	-5.3435
340.600	60.00	0.40	0.250	112.035	99.832	0.109	-12.203
510.900	60.00	0.40	0.250	138.710	125.811	0.093	-12.899
51.090	70.00	0.40	0.250	27.742	28.876	-0.041	1.1343
102.180	70.00	0.40	0.250	41.613	42.947	-0.032	1.3345
170.300	70.00	0.40	0.250	58.685	57.506	0.020	-1.1793
340.600	70.00	0.40	0.250	89.628	85.414	0.047	-4.2135
510.900	70.00	0.40	0.250	113.102	107.641	0.048	-5.4608
51.090	80.00	0.40	0.250	21.340	25.227	-0.182	3.8868
102.180	80.00	0.40	0.250	32.010	37.520	-0.172	5.5096
170.300	80.00	0.40	0.250	42.680	50.238	-0.177	7.5579
340.600	80.00	0.40	0.250	65.087	74.620	-0.146	9.5326
510.900	80.00	0.40	0.250	82.159	94.037	-0.145	11.878
51.090	50.00	0.45	0.250	41.613	45.179	-0.086	3.5661
102.180	50.00	0.45	0.250	69.355	67.195	0.031	-2.1604
170.300	50.00	0.45	0.250	92.829	89.972	0.031	-2.8569
340.600	50.00	0.45	0.250	141.911	133.638	0.058	-8.2734
510.900	50.00	0.45	0.250	174.988	168.413	0.038	-6.5750
51.090	60.00	0.45	0.250	36.278	37.568	-0.036	1.2901
102.180	60.00	0.45	0.250	60.819	55.875	0.081	-4.9443
170.300	60.00	0.45	0.250	82.159	74.815	0.089	-7.3440

340.600	60.00	0.45	0.250	125.906	111.124	0.117	-14.782
510.900	60.00	0.45	0.250	154.715	140.041	0.095	-14.674
51.090	70.00	0.45	0.250	32.010	32.142	-0.004	0.13245
102.180	70.00	0.45	0.250	51.216	47.805	0.067	-3.4107
170.300	70.00	0.45	0.250	67.221	64.010	0.048	-3.2109
340.600	70.00	0.45	0.250	104.566	95.076	0.091	-9.4903
510.900	70.00	0.45	0.250	128.040	119.817	0.064	-8.2235
51.090	80.00	0.45	0.250	26.675	28.080	-0.053	1.4052
102.180	80.00	0.45	0.250	41.613	41.764	-0.004	0.15051
170.300	80.00	0.45	0.250	53.350	55.920	-0.048	2.5704
340.600	80.00	0.45	0.250	78.958	83.060	-0.052	4.1018
510.900	80.00	0.45	0.250	97.097	104.674	-0.078	7.5768
51.090	50.00	0.25	0.300	18.139	26.148	-0.442	8.0086
102.180	50.00	0.25	0.300	32.010	38.889	-0.215	6.8792
170.300	50.00	0.25	0.300	43.747	52.072	-0.190	8.3247
340.600	50.00	0.25	0.300	68.288	77.343	-0.133	9.0553
510.900	50.00	0.25	0.300	86.427	97.470	-0.128	11.043
51.090	60.00	0.25	0.300	17.072	21.743	-0.274	4.6707
102.180	60.00	0.25	0.300	25.608	32.338	-0.263	6.7297
170.300	60.00	0.25	0.300	36.278	43.299	-0.194	7.0215
340.600	60.00	0.25	0.300	58.685	64.314	-0.096	5.6287
510.900	60.00	0.25	0.300	76.824	81.050	-0.055	4.2255
51.090	70.00	0.25	0.300	16.005	18.603	-0.162	2.5976
102.180	70.00	0.25	0.300	24.541	27.667	-0.127	3.1265
170.300	70.00	0.25	0.300	34.144	37.046	-0.085	2.9021
340.600	70.00	0.25	0.300	53.350	55.025	-0.031	1.6755
510.900	70.00	0.25	0.300	71.489	69.344	0.030	-2.1447
51.090	80.00	0.25	0.300	13.871	16.252	-0.172	2.3805
102.180	80.00	0.25	0.300	21.340	24.171	-0.133	2.8308
170.300	80.00	0.25	0.300	28.809	32.364	-0.123	3.5551
340.600	80.00	0.25	0.300	46.948	48.071	-0.024	1.1232
510.900	80.00	0.25	0.300	62.953	60.580	0.038	-2.3726
51.090	50.00	0.30	0.300	24.541	30.865	-0.258	6.3243
102.180	50.00	0.30	0.300	39.479	45.906	-0.163	6.4268
170.300	50.00	0.30	0.300	55.484	61.467	-0.108	5.9827
340.600	50.00	0.30	0.300	92.829	91.298	0.016	-1.5310
510.900	50.00	0.30	0.300	118.437	115.056	0.029	-3.3813
51.090	60.00	0.30	0.300	21.340	25.666	-0.203	4.3256
102.180	60.00	0.30	0.300	34.144	38.172	-0.118	4.0283
170.300	60.00	0.30	0.300	49.082	51.112	-0.041	2.0298
340.600	60.00	0.30	0.300	82.159	75.918	0.076	-6.2415
510.900	60.00	0.30	0.300	106.700	95.673	0.103	-11.027
51.090	70.00	0.30	0.300	20.273	21.959	-0.083	1.6860

102.180	70.00	0.30	0.300	28.809	32.659	-0.134	3.8504
170.300	70.00	0.30	0.300	40.546	43.730	-0.079	3.1842
340.600	70.00	0.30	0.300	69.355	64.953	0.063	-4.4015
510.900	70.00	0.30	0.300	90.695	81.856	0.097	-8.8392
51.090	80.00	0.30	0.300	17.072	19.184	-0.124	2.1117
102.180	80.00	0.30	0.300	24.541	28.532	-0.163	3.9908
170.300	80.00	0.30	0.300	33.077	38.203	-0.155	5.1264
340.600	80.00	0.30	0.300	52.283	56.744	-0.085	4.4615
510.900	80.00	0.30	0.300	67.221	71.511	-0.064	4.2896
51.090	50.00	0.25	0.150	29.876	27.380	0.084	-2.4960
102.180	50.00	0.25	0.150	43.747	40.722	0.069	-3.0250
170.300	50.00	0.25	0.150	54.417	54.526	-0.002	0.10885
340.600	50.00	0.25	0.150	74.690	80.989	-0.084	6.2985
510.900	50.00	0.25	0.150	90.695	102.063	-0.125	11.368
51.090	60.00	0.25	0.150	27.742	22.767	0.179	-4.9746
102.180	60.00	0.25	0.150	37.345	33.862	0.093	-3.4832
170.300	60.00	0.25	0.150	49.082	45.340	0.076	-3.7418
340.600	60.00	0.25	0.150	68.288	67.345	0.014	-0.94317
510.900	60.00	0.25	0.150	82.159	84.869	-0.033	2.7104
51.090	70.00	0.25	0.150	26.675	19.479	0.270	-7.1957
102.180	70.00	0.25	0.150	36.278	28.971	0.201	-7.3065
170.300	70.00	0.25	0.150	48.015	38.792	0.192	-9.2229
340.600	70.00	0.25	0.150	67.221	57.619	0.143	-9.6022
510.900	70.00	0.25	0.150	81.092	72.613	0.105	-8.4795
51.090	80.00	0.25	0.150	23.474	17.017	0.275	-6.4565
102.180	80.00	0.25	0.150	32.010	25.310	0.209	-6.7000
170.300	80.00	0.25	0.150	40.546	33.889	0.164	-6.6565
340.600	80.00	0.25	0.150	58.685	50.337	0.142	-8.3482
510.900	80.00	0.25	0.150	74.690	63.436	0.151	-11.254
51.090	50.00	0.30	0.150	36.278	32.320	0.109	-3.9580
102.180	50.00	0.30	0.150	55.484	48.069	0.134	-7.4147
170.300	50.00	0.30	0.150	73.623	64.364	0.126	-9.2593
340.600	50.00	0.30	0.150	104.566	95.601	0.086	-8.9651
510.900	50.00	0.30	0.150	128.040	120.478	0.059	-7.5617
51.090	60.00	0.30	0.150	33.077	26.875	0.187	-6.2018
102.180	60.00	0.30	0.150	48.015	39.971	0.168	-8.0436
170.300	60.00	0.30	0.150	65.087	53.521	0.178	-11.566
340.600	60.00	0.30	0.150	96.030	79.496	0.172	-16.534
510.900	60.00	0.30	0.150	121.638	100.182	0.176	-21.456
51.090	70.00	0.30	0.150	32.010	22.994	0.282	-9.0161
102.180	70.00	0.30	0.150	44.814	34.199	0.237	-10.615
170.300	70.00	0.30	0.150	59.752	45.791	0.234	-13.961
340.600	70.00	0.30	0.150	85.360	68.015	0.203	-17.345

510.900	70.00	0.30	0.150	106.700	85.714	0.197	-20.986
51.090	80.00	0.30	0.150	27.742	20.088	0.276	-7.6541
102.180	80.00	0.30	0.150	37.345	29.877	0.200	-7.4685
170.300	80.00	0.30	0.150	49.082	40.004	0.185	-9.0780
340.600	80.00	0.30	0.150	67.221	59.419	0.116	-7.8022
510.900	80.00	0.30	0.150	80.025	74.881	0.064	-5.1441
51.090	50.00	0.35	0.150	37.345	37.186	0.004	-0.15905
102.180	50.00	0.35	0.150	57.618	55.306	0.040	-2.3116
170.300	50.00	0.35	0.150	76.824	74.054	0.036	-2.7700
340.600	50.00	0.35	0.150	116.303	109.994	0.054	-6.3088
510.900	50.00	0.35	0.150	144.045	138.617	0.038	-5.4280
51.090	60.00	0.35	0.150	32.010	30.921	0.034	-1.0886
102.180	60.00	0.35	0.150	44.814	45.989	-0.026	1.1753
170.300	60.00	0.35	0.150	59.752	61.579	-0.031	1.8266
340.600	60.00	0.35	0.150	89.628	91.464	-0.020	1.8361
510.900	60.00	0.35	0.150	110.968	115.265	-0.039	4.2970
51.090	70.00	0.35	0.150	27.742	26.456	0.046	-1.2863
102.180	70.00	0.35	0.150	39.479	39.347	0.003	-0.13153
170.300	70.00	0.35	0.150	53.350	52.685	0.012	-0.66467
340.600	70.00	0.35	0.150	77.891	78.255	-0.005	0.36375
510.900	70.00	0.35	0.150	99.231	98.618	0.006	-0.61265
51.090	80.00	0.35	0.150	25.608	23.112	0.097	-2.4958
102.180	80.00	0.35	0.150	37.345	34.375	0.080	-2.9704
170.300	80.00	0.35	0.150	51.216	46.027	0.101	-5.1892
340.600	80.00	0.35	0.150	74.690	68.365	0.085	-6.3253
510.900	80.00	0.35	0.150	91.762	86.155	0.061	-5.6073