

01174



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

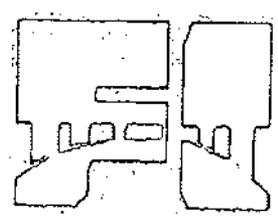
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“MODELO REOLÓGICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, PARA LAS LECHADAS DE CEMENTO TIXOTRÓPICO, ÚTIL EN FORMACIONES CON PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN”

290639

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA PETROLERA
(ESPECIALIDAD EN PERFORACIÓN)

P R E S E N T A:
ING. DIEGO E. BAUTISTA PASTRANA



Estudios de Posgrado

CD. UNIVERSITARIA, MEX. D.F.

MARZO DEL 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA
OF. 101/2001/SE-60.2

BIOL. FRANCISCO J. INCERA UGALDE

Jefe de la Unidad de Administración del Posgrado
Dirección General de Administración
Escolar, UNAM
Presente.

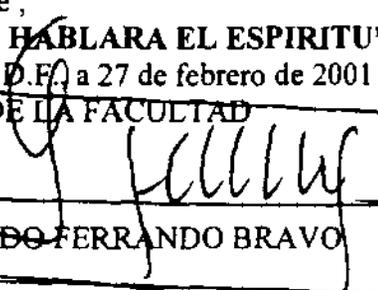
Esta facultad informa a usted que el alumno **DIEGO ENRIQUE BAUTISTA PASTRANA**, ha solicitado autorización para presentar examen con tesis, con el fin de obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción en (Petrolera) 490.

El mencionado alumno ha elaborado el trabajo titulado **"MODELO REOLOGICO EN FUNCION DEL TIEMPO, PARA LAS LECHADAS DE CEMENTO TIXOTROPICO, UTIL EN FORMACIONES CON PERDIDA DE CIRCULACION"** el cual no tiene valor en créditos académicos.

Tomando en cuenta que el interesado ha cumplido con todos los requisitos que se exigen para sustentar dicho examen, no hay ningún inconveniente en que se lleve a cabo dicho acto ante el jurado integrado por los profesores:

Presidente: DR. JESUS RIVERA RODRIGUEZ
Vocal: ING. EUSEBIO CAPITANACHI GONZALEZ
Secretario: DR. DANIEL GARCIA GAVITO
Suplente: DR. VICENTE CASARIEGO GONZALEZ
Suplente: M. EN I. JOAQUIN MENDIOLA SANCHEZ

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F. a 27 de febrero de 2001
EL DIRECTOR DE LA FACULTAD


M. EN C. GERARDO FERRANDO BRAVO

Anexos: cinco votos originales

BJS:abc.

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de dos modelos matemáticos (Plástico de Bingham y Ley de Potencias modificados), para el comportamiento reológico de la lechada de cemento tixotrópico en función del tiempo, que consideran el efecto de la cinética de reacción (fraguado) y la evolución dinámica de los geles por tixotropía. Contemplan la temperatura y presión a las condiciones promedio para el asentamiento de tuberías cortas de revestimiento (liners) de 9 5/8" del campo Cantarell; así como, la concentración de aditivo tixotrópico y retardador. Además, consideran la característica de flujos reactivos cuya estructura molecular se modifica con el tiempo originando un comportamiento dinámico de la reología, este perfil reológico toma en cuenta el cambio de fases de líquido a sólido de la lechada de cemento. Disponer de modelos de estas características será de gran utilidad para el diseño y optimización real y precisa de la hidráulica de colocación de las lechadas de cemento. Se describe el proceso de evaluación reológica del cemento mediante un *viscosímetro* de alta presión y temperatura (Fann 70), para obtener una serie de datos experimentales de esfuerzo de corte en función del tiempo. También, se describe su diseño experimental y se hace un análisis fenomenológico de los resultados. Por último, se presentan los modelos obtenidos (operativo y generalizado) a partir de técnicas estadísticas y de optimización. Los modelos se diseñaron en forma simple, para tener una integración sencilla de las ecuaciones de cambio y aplicación, no obstante, incluyen en sus parámetros la dependencia del tiempo, que modelos convencionales no abordan limitando las soluciones de los diferentes problemas en los procesos de cementación.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A Dios por prestarme la vida.

A mi patria por ser tan noble.

Al Instituto Mexicano del Petróleo, por la gran oportunidad que me ha dado para continuar con mi preparación profesional. Por haberme brindado sus recursos humanos y materiales para culminar mi carrera universitaria.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Sección de Estudios de Posgrado en Ingeniería Petrolera, por ser el crisol, el cual ha permitido que cumpla con una valiosa meta: mi Maestría.

Al Instituto Politécnico Nacional, por haberme dado bases firmes y sólidas.

A mis amigos del Grupo de Perforación y Mantenimiento de pozos del I.M.P., por su ayuda y apoyo desinteresado, Davicito, Calas, Fer, Jorge, Jimmy, Ruth, Casta, etc., etc., muchas gracias.

A mis compañeros de banca, Luis S., Fer, Oswaldo, Edgar, Gus, José Luis, Jorge, David, Franco, Iza, Luis E. etc. Muchas gracias por todas sus observaciones, comentarios, por su tiempo, por haber vuelto a compartir la vida de estudiantes. ¡Adelante compañeros, a seguirse capacitando!

A los compañeros de la SPE, gracias por darme la oportunidad de pertenecer a esta excelente Sociedad y por haber compartido momentos valiosísimos de mi vida personal y profesional. Gracias: Gus, Alba, Liz, Ray, Nelly, Omar, etc.

A mi querida esposa, Miriam, por toda su paciencia, trabajo, dedicación, esfuerzo, carácter, muchas gracias.

A mis hijos: Samuel, Paola y Sebastián, por ser una fuente inagotable de vida y ejemplo.

A mis padres, Olivia y Raúl, por todo el amor, educación y ejemplo, que me han dado. Por haberme enseñado a amar y ser feliz.

A mis hermanos: Raúl, Manolo, Blanca, Carmen y Maru, por todo el sacrificio que tuvieron que hacer para sacarnos adelante. A Juanito, Alejandro y Conchita, por haber compartido juegos, aventuras y momentos muy felices. A Moni, Cris y Claudia, por tantos consejos que me han dado.

A todos los excelentes profesores de la sección de posgrado en Ingeniería Petrolera, por haber dedicado su tiempo, su paciencia, sus conocimientos y haber compartido sus experiencias. Muchas gracias.

A mis sinodales por haber dedicado su tiempo en la corrección y perfección de este trabajo. Un agradecimiento especial.

A los profesores de la licenciatura de Ingeniería Petrolera (Yacimientos y Producción) de la UNAM y de la ESIA del IPN, por ayudarme a complementar mi formación petrolera.

En especial a los M. en C. Ignacio R. Cortés Monroy y Ricardo Hurtado Medrano, por su apoyo incondicional empeñado en esta tesis. Muy agradecido.

Al Ing. David Velázquez Cruz, porque sin su preocupación y ayuda no hubiera alcanzado este sueño. Gracias por la calidad humana que tienes, nunca la pierdas.

CONTENIDO

	Página
PORTADA	i
OFICIO DE ACEPTACIÓN	ii
RESUMEN	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
CONTENIDO	vi
LISTA DE TABLAS Y GRÁFICAS	ix
CAPITULO 1. Introducción.	
1.1 Objetivo.	1
1.2 Problemática	1
CAPITULO 2. Generalidades del cemento.	
2.1 Composición química del cemento.	5
2.2 Caracterización del cemento.	9
2.3 Aditivos para cementos y su efecto en el tiempo de fraguado.	21
2.4 Cementos tixotrópicos	26
2.5 Proceso de cementación convencional.	32
2.6 Proceso de una cementación tixotrópica	37
CAPITULO 3. Dinámica de flujo de las lechadas de cemento	
3.1 Proceso de hidratación del cemento.	42
3.1.1 Evidencia experimental de la evolución estructural del cemento en el tiempo.	44
3.2 Principios reológicos.	46
3.3 Comportamiento reológico dependiente del tiempo.	58
CAPITULO 4. Desarrollo del modelo.	
4.1 Diseño del modelo reológico.	66
4.2 Descripción de pruebas.	68
4.2.1 Pruebas experimentales para obtener el tiempo bombeable.	68
4.2.2 Pruebas experimentales para obtener la reología a presión y temperatura de pozo.	70
4.3 Modelado.	86
4.3.1 Modelo operativo.	88
4.3.2 Modelo generalizado.	93
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98

NOMENCLATURA	100
REFERENCIAS	101
APÉNDICES	
Apéndice A Técnica de análisis factorial.	104
Apéndice B Técnica de análisis de varianza.	107
Apéndice C Técnica de análisis de regresión.	109
Apéndice D Gráficas y pruebas estadísticas complementarias	113

*“Una teoría es más impresionante cuanto más
simples son sus premisas, cuanto más cosas
diferentes relaciona, y cuanto más extensa
es su área de aplicación”*

Albert Einstein

LISTA DE TABLAS

TABLA	D E S C R I P C I Ó N	PAGINA
1.1	Costos de recementación.	4
2.1	Nomenclatura del cemento.	6
2.2	Análisis típico de los óxidos de un cemento (API clase H)	9
2.3	Equipo utilizado para la evaluación física y química del cemento.	18
2.4	Especificaciones físicas del cemento clase H.	21
2.5	Especificaciones químicas del cemento clase H.	21
2.6	Propiedades de las lechadas de cemento y desarrollo de las lechadas tixotrópicas que contienen sulfato de calcio semihidratado.	30
4.1	Matriz de experimentos para la obtención del tiempo bombeable de las lechadas de cemento	69
4.2	Tiempos bombeables obtenidos empleando el consistómetro presurizado.	70
4.3	Matriz de experimentos utilizada para la obtención de la reología de una lechada de cemento	70
4.4	Lecturas obtenidas en el viscosímetro Fann 70.	72
4.5	Lecturas obtenidas en el viscosímetro Fann 70 de la prueba núm. 9.(operativo)	87
4.6	Obtención de los parámetros α y β mediante el software Estadístico Statistica 5.1 para windows.(operativo)	89
4.7	Lecturas obtenidas en el viscosímetro Fann 70 de la prueba núm. 9. (generalizado)	93
4.8	Obtención de los parámetros α y β mediante el software Estadístico Statistica 5.1 para windows.(generalizado)	94
A1	Un experimento factorial	98
A2	Un experimento factorial con interacción	98
B1	Datos típicos para un experimento unifactorial	101
D1	Comparación predictiva entre el modelo Ley de potencias y Plástico de Bingham.	115

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	D E S C R I P C I Ó N	PAGINA
2.1	Proceso de fraguado de una lechada de cemento.	9
2.2	Consistómetro presurizado.	13
2.3	Filtro prensa de alta temperatura.	14
2.4	Cámara de curado.	16
2.5	Comportamiento reológico generalizado de los fluidos tixotrópicos.	28
2.6	Canalización típica del cemento.	33
2.7	Tubería de revestimiento excéntrica.	34
2.8	Migración de gas a través del cemento.	35
2.9	Fracturamiento de formaciones débiles.	35
2.10	Ejemplos de espacio anular no controlado.	36
2.11	Tubería de revestimiento mal cementada.	36
3.1	Representación esquemática de la hidratación del cemento Portland.	43
3.2	Equipo utilizado en la experimentación de dispersión de luz de la lechada de cemento.	45
3.3	Crecimiento del tamaño de partícula de una lechada de cemento.	46
3.4	Flujo entre placas paralelas (placa superior en movimiento).	48
3.5	Modelos no-Newtonianos en estado estacionario.	49
3.6	Respuesta dependiente del tiempo de un fluido tixotrópico a un cambio de paso en la velocidad de corte.	59
3.7	Curvas de flujo de dos lechadas de cemento en un viscosímetro cilíndrico coaxial estándar-escala lineal.	61
3.8	Ajuste de Herschel-Bulkley a los datos de la formulación del cemento presentada en la fig. 3.7.	62
3.9	Esfuerzo de corte contra tiempo de corte (resultados obtenidos usando un viscosímetro a una velocidad de corte de 511 s^{-1}).	64

FIGURA	D E S C R I P C I Ó N	PAGINA
4.1	Viscosímetro computarizado Fann 70 (alta presión y alta temperatura)	67
4.2	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte - prueba No. 1	73
4.3	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte - prueba No. 2	74
4.4	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte - prueba No. 5	74
4.5	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte - prueba No. 8	75
4.6	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte de las pruebas Nos. 3, 4, 6, 7, 9 y 10.	77
4.7	Esfuerzo de corte contra tiempo de las pruebas Nos. 1 a la 10	79
4.8	Viscosidad aparente contra tiempo de la prueba No. 1	81
4.9	Viscosidad aparente contra tiempo de la prueba No. 2	82
4.10	Viscosidad aparente contra tiempo de la prueba No. 5	83
4.11	Viscosidad aparente contra tiempo de la prueba No. 8	84
4.12	Viscosidad aparente contra tiempo de las pruebas Nos. 3, 4, 6, 7, 9 y 10	85
4.13	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte a los diferentes tiempos de la tabla 4.5.	87
4.14	Ajuste parcial del modelo en función del esfuerzo de corte y de la velocidad de corte (operativo), $t=40$ min.	90
4.15	Ajuste del modelo propuesto con respecto a los valores observados de la prueba no. 9. (operativo), $t=40$ min.	92
4.16	Esfuerzos de corte contra velocidad de corte de la tabla 4.7	94
4.17	Ajuste parcial del modelo en función del esfuerzo de corte y de la velocidad de corte (generalizado), $t=20$ min.	95
4.18	Ajuste del modelo propuesto con respecto a los valores observados de la prueba no. 9. (generalizado)	97
D1	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte del modelo operativo para un tiempo de 10 min.	113
D2	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte del modelo operativo para un tiempo de 20 min.	113
D3	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte del modelo operativo para un tiempo de 30 min.	114

FIGURA	D E S C R I P C I Ó N	PAGINA
D4	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte del modelo operativo para un tiempo de 50 min.	114
D5	Ajuste del coeficiente alfa del modelo operativo	117
D6	Ajuste del coeficiente beta del modelo operativo	117
D7	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte del modelo generalizado para un tiempo de 10 min.	118
D8	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte del modelo generalizado para un tiempo de 30 min.	118
D9	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte del modelo generalizado para un tiempo de 40 min.	119
D10	Esfuerzo de corte contra velocidad de corte del modelo generalizado para un tiempo de 50 min.	119
D11	Ajuste del coeficiente alfa del modelo generalizado	121
D12	Ajuste del coeficiente beta del modelo generalizado	122

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo

Obtener como productos dos modelos matemáticos (operativo y generalizado), para el comportamiento reológico de la lechada de cemento tixotrópico en función del tiempo, es decir, que considere la cinética de reacción (fraguado), y la evolución dinámica de los geles por tixotropía.

1.2 Problemática del Activo Cantarell

El comportamiento reológico de una lechada de cemento es extremadamente complejo y los modelos reológicos convencionales para caracterizarlo solo describen el comportamiento de las condiciones de flujo bajo rangos limitados de velocidad de corte sin considerar su alta dependencia del tiempo. La caracterización del flujo de las lechadas de cemento es un reto debido a la importancia de contar con un modelo reológico dinámico que considere la característica inherente a toda lechada; esto es que son flujos reactivos cuya estructura molecular se modifica con el tiempo originando un comportamiento dinámico de la reología, **es decir una reología dependiente del tiempo**, este perfil reológico comprende el cambio de fases de líquido a sólido, también deben ser considerados con mayor detalle e incluidos en dichos modelos reológicos los efectos de concentración, presión y temperatura, esta última juega un papel importante para acelerar la reacción de hidratación del cemento y con ello el cambio de las propiedades reológicas. En lechadas no convencionales como lo son las tixotrópicas, el fenómeno se complica aun más por que se incrementa un factor que afecta a la estructura molecular de la lechada y con esto su reología en forma reversible al generar pequeñas estructuras de gel que se consolidan en el reposo y se destruyen con el corte, siendo este también un comportamiento dependiente del tiempo. El disponer de modelos con estas características será

de gran utilidad para un diseño y optimización más real y precisa de la hidráulica de colocación de las lechadas de cemento.

El auto soporte de una columna de cemento tixotrópico evita las pérdidas de circulación emulando a un lodo de baja densidad, pero conservando las propiedades mecánicas adecuadas después del fraguado. Si se tiene un mejor entendimiento del comportamiento reológico en el tiempo de una lechada de cemento tixotrópico, será posible controlar las reticulaciones debidas a efectos de tixotropía por reacción química y diseñar estrategias efectivas para la cementación en zonas con severas pérdidas de circulación, como las que se encuentran en la cementación de liners de 9 5/8" del Activo Cantarell. De esta forma se contribuirá a la solución de un problema muy particular de la Industria Petrolera Nacional. El estado actual de este problema tiene las siguientes implicaciones:

- El estudio del fenómeno a través de modelos independientes del tiempo que tratan la lechada de cemento como un lodo no reactivo, tienen una limitada potencialidad de predicción y aplicación bajo condiciones reales, y complejas de flujo, así como el cambio de fase a lo largo del pozo.
- Pérdida de cemento debido a la alta permeabilidad (3 a 5 Darcys) de la formación brecha paleoceno cretácico superior y una baja presión equivalente a 0.50 gr/cc.
- Cementaciones forzadas sin el éxito esperado y alternativas con el riesgo de dañar mecánicamente la tubería.
- Altos costos de operación y de materiales utilizados en la recementación de las tuberías de producción (ver tabla 1.1).
- Difícil cementación de los liners en la cima de la brecha productora, (zona de pérdida total).
- Riesgo de fuga de gas amargo a través de la tubería, produciéndose canalizaciones, roturas, desprendimientos y/o altas relaciones gas-aceite.

En la actualidad se utilizan cementos gasificados para obtener lechadas de baja densidad que eviten las pérdidas de circulación, sin llegar a las condiciones propicias, debido principalmente al detrimento de las propiedades mecánicas del material cementante, con el riesgo de que estos cementos gasificados propicien canalizaciones que induzcan la migración del gas de la formación hacia la superficie y alterar la adecuada operación.

También se realiza el balanceo de columnas, con lodo en la sección anular para evitar la fuga de gas amargo durante la cementación. En este aspecto las cementaciones se han optimizado para alcanzar el máximo nivel en la zona de pérdida de acuerdo a la columna hidrostática de cemento convencional en dicha zona y el resultado es siempre una cementación parcial que nunca alcanza la boca de liner de 9 5/8". Terminada la cementación en etapas con casquete de gas, el empacador es el único medio mecánico que soporta la carga en él traslape del liner, además de sellar el espacio anular en esta zona, quedando el elastómero expuesto a la presión y reactividad del gas amargo provocando la disminución de la vida útil del mismo.

De usarse retenedores y de fallar la operación, estos se tendrán que remover por molienda pudiendo dañar mecánicamente la tubería.

La explotación del yacimiento implica su depresionamiento progresivo, representando un límite para el balanceo de columnas. Es más fácil, técnica y económicamente, adaptar las propiedades del fluido a las condiciones del pozo en especial si la zona de pérdida es grande.

En la tabla num. 1.1 se puede observar los costos que se emplearon en trabajos de recementación de las tuberías del Activo Cantarell, para los años de 1997 y 1998, en la cual se muestra, por ejemplo, el número de pozos intervenidos en cada año y los costos involucrados en los trabajos de recementación. Para 1997 los costos por este rubro ascendieron a 7.1 millones de dolares americanos y para

1998 fue de 2.3 millones de dolares americanos, sin contar los costos por materiales ni herramientas especiales.

Costos de Recementación de la Boca de Liner		
Año	1997	1998
Numero de Pozos	22	17
Días recementando/año	42	13
Costo perforación mmusdls/día	0.068	0.075
Costo total de perforación mmusdls/año	2.9	1.0
Producción diferida bls/año	420,000	130,000
Costo de producción diferida/año mmusdls	4.2	1.3
Costo total de Recementación, mmusdls	7.1	2.3
Costo Total en 1997-1998		9.4 MM USDLS

Estos costos no incluyen el valor de los productos utilizados, cemento más aditivos, ni las herramientas especiales que se utilizan, tales como retenedores y molinos más el costo del personal especializado. se consideran 8.000 BPD/pozo y 10 usdls por barril.

Tabla 1.1 Costos de recementación de liners de 9 5/8" del Activo Cantarell.

CAPITULO 2 GENERALIDADES DEL CEMENTO

2.1 Composición química del cemento¹

El cemento es una mezcla de caliza y arcilla finamente pulverizada, las cuales se calcinan a una temperatura aproximada de 1500°C, para formar una piedra oscura y dura llamada *clinker*, que contiene los compuestos químicos que imparten las propiedades cementantes de: fraguado, endurecimiento, etc. El *clinker* se muele finamente junto con una piedra de yeso natural, que actúa como retardador del fraguado. El producto obtenido de esta mezcla es el cemento Portland.

Los compuestos que conforman el cemento son trióxidos, que se presume son de oxidación lenta, es decir terminan su grado de oxidación más tarde al airearse y enfriarse.

Componentes principales del cemento

Silicato tricálcico (3CaO SiO_2).- Este compuesto está formado de la combinación del óxido de calcio (CaO) y del óxido de silicio (SiO_2). El silicato tricálcico está presente en mayor proporción en la mayoría de los cementos, contribuye en gran medida en todas las etapas de desarrollo de la resistencia del cemento, y es el factor principal que produce la hidratación temprana del cemento.

Silicato dicálcico (2CaO SiO_2).- Compuesto de hidratación lenta, que proporciona un aumento gradual en la resistencia del cemento, ocurriendo esto en un periodo de tiempo largo.

Aluminato tricálcico ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$).- Es un compuesto químico formado por la combinación del óxido de calcio (CaO) y el óxido de aluminio (Al_2O_3), que acelera el tiempo de bombeabilidad (espesamiento) de la lechada, resultando también responsable de la susceptibilidad al ataque químico de los sulfatos sobre el

cemento, clasificándose de acuerdo con la concentración de este compuesto en: cementos de moderada resistencia a los sulfatos (8% de aluminato) y cementos de alta resistencia a los sulfatos (3% de aluminato). Al combinarse con los sulfatos forma un compuesto expansivo conocido como germen o bacilo del cemento, que es un sulfoaluminato cálcico hidratado, el cual aumenta grandemente su volumen, lo que produce esfuerzos internos en el cemento. Por lo anterior este puede ser un compuesto indeseable en el cemento.

Aluminoferrita tetracálcica ($4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$).- Es un compuesto químico formado por la combinación del óxido de calcio (CaO), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3). Es un compuesto de bajo calor de hidratación, su control es deseable puesto que incrementándose este, disminuye el aluminato tricálcico. Este aumento puede lograrse por adición de óxido férrico en la preparación del clinker.

Los componentes químicos del cemento son muy complejos y con el fin de no utilizar fórmulas químicas sofisticadas, dentro de la industria cementera, se ha adoptado la utilización de la nomenclatura que se presenta en la tabla 2.1.

Compuesto	Fórmula Química	Nomenclatura Común
Silicato tricálcico	3CaO SiO_2	C_3S
Silicato dicálcico	2CaO SiO_2	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrita tetracálcica	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Tabla 2.1 Nomenclatura de los componentes principales del cemento

Otro grupo de elementos menores que constituyen al cemento, lo forman componentes que se agregan al clinker durante la molienda final y otros que

quedan libres durante la calcinación de las materias primas, los últimos son elementos que no se alcanzan a combinar en los hornos. Este grupo de elementos representa el 10% del peso del cemento y lo forman:

Cal libre u óxido de calcio (CaO libre).- Es un compuesto indeseable, debido a que ocasiona gelificaciones prematuras y hace más difícil la retardación del cemento, además de disminuir el porcentaje del C_3S y la resistencia final del cemento. Cuando se presenta en exceso, puede ocasionar expansión debido a que aumenta su volumen después de que los otros compuestos del cemento ya han alcanzado su volumen final, lo que ocasiona esfuerzos internos e inclusive el agrietamiento del cemento fraguado. El porcentaje de este compuesto deberá tener un valor mínimo.

Yeso o sulfato de calcio ($CaSO_4$).- Proviene del yeso que se le añade al clinker durante la molienda final. Regula la acción química del cemento con el agua y controla el tiempo de fraguado. Es muy importante la adecuada dosificación del yeso, ya que su carencia o exceso podría provocar, además de lo anteriormente mencionado, cambios volumétricos en el cemento.

Óxido de magnesio (MgO).- Comúnmente llamada magnesia, aunque en pequeñas cantidades, está presente en todos los cementos portland debido a que en la naturaleza, se encuentra acompañando a las calizas en forma de carbonato de magnesio. Al igual que la cal (CaO), su presencia en exceso puede provocar aumento en el volumen y un grado de desarrollo muy lento.

Álcalis (Na_2O y K_2O).- Los óxidos de sodio y potasio, son compuestos indeseables ya que altos porcentajes de éstos ocasionan dilatación y agrietamiento; además provocan la disminución de la resistencia a la compresión, elasticidad y durabilidad del cemento fraguado. Así mismo pueden provocar cierta dificultad para regular el tiempo de fraguado.

Residuo insoluble.- Este representa una pequeña fracción de cemento formada por una mezcla de óxidos no solubles en ácido clorhídrico, los cuales no intervienen en las propiedades del cemento. El residuo insoluble señala el grado de conversión obtenido en las reacciones que se efectúan en el horno, debido a que solamente después de su combinación con la cal durante el proceso de calcinación, es que llegan estos óxidos a ser solubles en ácidos; además indica si un cemento ha sido contaminado, ya que parte de estos óxidos provienen de las impurezas (tipo arcilloso), contenidas en el yeso que se agrega al clinker.

Agua y dióxido de carbono (CO₂) identificados por pérdida en ignición.- También conocida como pérdida por calcinación, representa el porcentaje de pérdida de peso que sufre el cemento después de ser sometido a calentamiento de 1000°C. Las sustancias que se pierden a esta temperatura son: agua y CO₂. El clinker al salir del horno tiende a absorber humedad del medio ambiente y al igual que el cemento, durante su almacenamiento sigue absorbiendo humedad. El CO₂ también se absorbe de la atmósfera. La pérdida por ignición es por lo tanto una medida de la edad del cemento.

Trióxido de azufre (SO₃).- Reduce la resistencia a la compresión y afecta los tiempos de fraguado del cemento.

Fluoruros.- Reducen la resistencia a la compresión a temprana edad y dificultan los tiempos de fraguado.

Óxido de manganeso (Mn₂O₃).- Proporciona el color oscuro al cemento.

Óxido de cromo (Cr₂O₃).- Mejora la resistencia del cemento y a la vez lo oscurece un poco.

Un análisis químico, comúnmente realizado de los óxidos de un cemento API clase H utilizado en un pozo, se muestra en la tabla 2.2.

Determinación	%
Dióxido de silicio (SiO_2)	22.43
Óxido de calcio (CaO)	64.77
Óxido de hierro (Fe_2O_3)	4.10
Óxido de aluminio (Al_2O_3)	4.76
Óxido de magnesio (MgO)	1.14
Trióxido de azufre (SO_3)	1.67
Óxido de potasio (K_2O)	0.08
Pérdida por ignición	0.54

Tabla 2.2 Análisis típico de los óxidos de un cemento (API clase H)

La química del cemento es muy compleja, su comportamiento en el pozo es obtenida normalmente con un análisis simple de los óxidos y pruebas físicas basadas en la bombeabilidad, resistencia a la compresión y propiedades reológicas.

2.2 Caracterización del cemento

Cuando la lechada de cemento (mezcla de cemento, agua y aditivos), es colocada a la profundidad deseada en el espacio anular del pozo, conformado por la pared del agujero y el diámetro exterior de la tubería de revestimiento, se lleva a cabo un proceso de fraguado del cemento, el cual tiende al desarrollo de una estructura plástica reticulada con la consistencia de un gel, que posteriormente se solidifica como se puede apreciar en la figura 2.1.

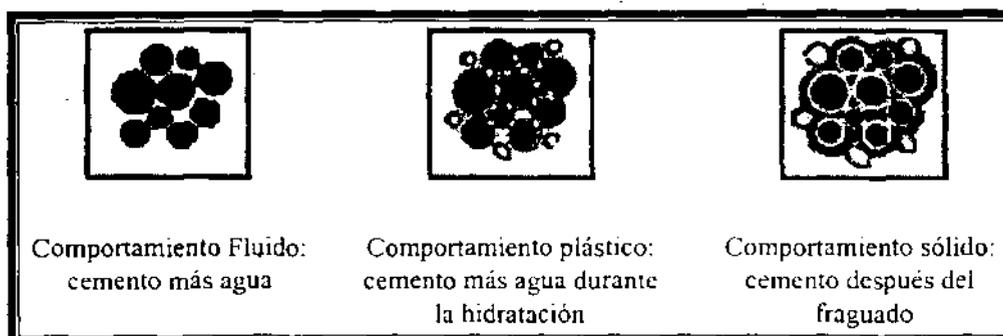


Figura 2.1 Proceso de fraguado de una lechada de cemento.

En sí, el proceso que ocurre con el cemento es el cambio de un compuesto inestable (energía interna elevada) a uno estable, el cual se presenta como una masa sólida unida por medio de fuerzas moleculares; resultado de **una reacción química** entre los compuestos del cemento y del agua, la cual recibe el nombre de **hidratación del cemento**. La reacción es exotérmica, es decir, en dicho intercambio químico sucede un desprendimiento de calor, conocido como calor de hidratación.

Propiedades físicas

Las propiedades físicas del cemento se pueden definir de acuerdo a las pruebas físicas que se realizan a la lechada del cemento. Estas pruebas son, con base en las normas API RP10 y PEMEX-IMP 2/93, las siguientes:

- Agua libre
- Área de superficie específica (Blaine)
- Tiempo de espesamiento
- Pérdida de agua
- Resistencia a la compresión
- Comportamiento reológico
- Densidad de la lechada

Agua libre

Cuando la lechada de cemento es dejada en reposo, el agua libre se recolecta en la parte superior de la lechada como resultado de la precipitación de las partículas del cemento dentro de la lechada. En el laboratorio, el agua libre será la cantidad de agua en milímetros, que desarrolla una lechada en la parte superior de una probeta de 250 ml, después de que ha permanecido sin movimiento durante dos horas. Al finalizar la prueba hay que identificar lo siguiente: si la lechada sale fluida, semifluida o pastosa y si la columna de cemento, dentro de la probeta,

presenta grietas por donde puede facilitarse la entrada de fluidos de la formación al momento de la operación de campo; qué tan homogénea sea la mezcla de agua-cemento y aditivos, si es que los tiene. Es importante que la medición de esta propiedad, en el laboratorio, se lleve a cabo a condiciones de temperatura de circulación en el fondo del pozo para el cual se realiza la prueba.

Área de superficie específica (Blaine)

La superficie específica de un cemento es el indicativo de qué tan finamente ha sido molido, este valor también es conocido como finura. Cuando se desea tener una resistencia mecánica elevada en forma rápida, se debe seleccionar un cemento con buena composición química y un blaine adecuado. También sucede que a mayor finura se genera un mayor calor de hidratación y si ésta es excesiva, los fenómenos de exudación son más acentuados. La determinación del área de superficie específica se efectúa normalmente con el permeabilímetro Blaine. Con este aparato se obtiene la permeabilidad al aire de una muestra de polvo de cemento y el resultado se utiliza para calcular el valor del área de superficie específica. Otra técnica que puede utilizarse para determinar el área de superficie específica es utilizando un turbidímetro, en el cual, el cambio de la intensidad de un haz de luz al pasar a través de una porción de partículas puede relacionarse con el tamaño de las partículas. También se puede obtener la medida del área de superficie específica mediante la técnica de adsorción de gas, la cual se obtiene por el método Brunauer-Emmett-Teller (BET).

Tiempo de espesamiento

Es el tiempo durante el cual una lechada de cemento se mantiene fluida y bombeable, bajo condiciones de presión y temperatura. El tiempo de espesamiento significa realmente "tiempo bombeable" y está definido por el API como el tiempo requerido para que la lechada alcance 100 unidades de

consistencia (Uc). Este grado de espesamiento es equivalente a un torque de 2 080 gr-cm aplicados a la paleta de la flecha en un probador de tiempo de espesamiento, el cual tiene como aparato de medición un potenciómetro (un valor de tensión de 10 volts equivale a 100 Uc de la lechada). Al alcanzar el valor de 100 Uc, la lechada se considera como un producto fraguado y será imposible desplazarla en el pozo. En el campo, el tiempo de espesamiento se traduce como el tiempo disponible para mover la lechada desde el equipo mezclador, en la superficie, hasta su lugar final de colocación en el pozo.

La prueba de tiempo de espesamiento es muy importante desde el punto de vista operativo, debido a que si el diseño de la lechada no cumple con el tiempo mínimo requerido en el campo para colocarla dentro del pozo, ésta fraguará antes y se tendrán problemas de atrapamiento de tubería, lo cual implicaría realizar trabajos muy costosos de pesca o el abandono del pozo. En la realización de la prueba de tiempo de espesamiento se utiliza un consistómetro presurizado. Este equipo consiste básicamente de una celda cilíndrica rotatoria para la lechada de cemento, equipada con un ensamble de propela estacionaria, todo dispuesto debidamente en una cámara de presión capaz de resistir las presiones específicas de la prueba. El espacio entre la celda de la lechada y las paredes de la cámara de presión debe llenarse completamente con un aceite derivado del petróleo con un punto de ignición que cumpla satisfactoriamente las normas de seguridad aplicables.

Un consistómetro presurizado se ilustra en la figura 2.2.

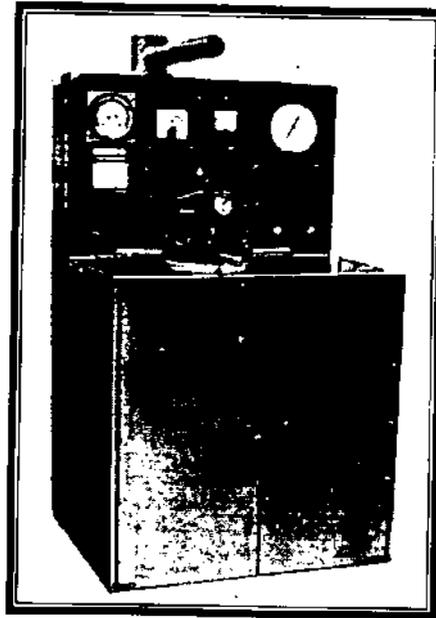


Figura 2.2 Consistómetro presurizado.

Pérdida de agua

La pérdida de agua de una lechada resulta de la aplicación de una presión diferencial sobre una interfase permeable. Esta presión libera agua de la lechada y hace cambiar las características de la misma. El tener valores bajos de pérdida de agua nos permite tener las ventajas siguientes: a) la lechada se mantiene fluida por el tiempo bombeable para el cual fue diseñada; b) se evita la reducción de la presión hidrostática ejercida por la columna de lechada de cemento en el fondo del agujero; c) se mantienen las propiedades reológicas de la lechada según el comportamiento predicho en laboratorio; y d) se reduce el daño a la formación productora. La presión diferencial se aplica a la lechada de cemento mediante un aparato para prueba de pérdida de filtrado según la norma API-SPEC 10, apéndice F; un ejemplo del equipo utilizado, conocido como filtro-prensa, se ilustra en la figura 2.3. Una baja pérdida de fluido de lechada es aquella menor de 100 cm^3 en 30 minutos, bajo una presión diferencial de 1000 lb/pg^2 a través de una malla 325 y a la temperatura de circulación del pozo a cementar.

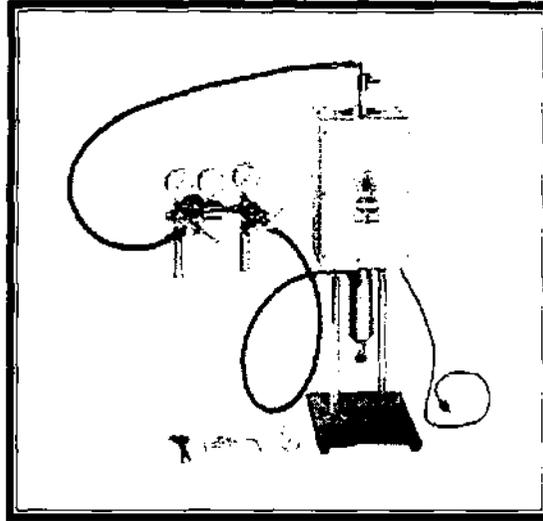


Figura 2.3 Filtro prensa de alta temperatura.

La solidez de una lechada de cemento es la resistencia que ofrece al aplastamiento o al estiramiento (resistencia a la compresión o resistencia a la tensión respectivamente). Un buen valor de resistencia a la compresión va a ser aquel que nos permita cumplir satisfactoriamente con los requerimientos siguientes: 1) soportar la tubería en el agujero; 2) prevenir la entrada de fluidos indeseables a la tubería de revestimiento o migración de una formación a otra; 3) limitar los fluidos inyectados durante un tratamiento de estimulación a la formación deseada; 4) resistir las cargas de la barrena durante la perforación del pozo. La prueba de resistencia a la compresión anteriormente llamada resistencia compresiva temprana, se ve afectada por las condiciones de presión y temperatura a la cual está fraguando, observándose que su resistencia se incrementa gradualmente a medida que transcurre el tiempo. El curado del cemento es el proceso de someter a condiciones específicas de presión y temperatura las muestras de lechadas de cemento, por un tiempo determinado, para estudiar el desarrollo de la resistencia a la compresión. El curado a presión, generalmente tiene una mayor resistencia que el cemento curado a presión atmosférica y cuyo efecto es más pronunciado a temperaturas mayores.

Lo anterior se debe a que existe un decremento en la resistencia del cemento por la continuación de reacciones químicas, debido a que toda el agua disponible en la lechada de cemento se evapora cuando el curado es a presión atmosférica y altera las reacciones químicas causando el decremento de la resistencia del cemento. El factor más importante en la resistencia a la compresión de un cemento, es el tiempo requerido para que desarrolle una resistencia conveniente; distintos autores han escrito al respecto y han llegado a la conclusión de que la resistencia a la compresión mínima que debe experimentar una lechada de cemento es de 1000 lb/pg^2 , para poder cumplir satisfactoriamente con los requerimientos antes citados. La velocidad a la que se desarrolla la resistencia a la compresión se puede incrementar con el uso de aceleradores.

Para realizar la prueba de resistencia a la compresión, el API recomienda el uso de cubos de cemento de 2 pg de longitud por lado y curar las muestras sumergiéndolas en agua a presión atmosférica o a una presión específica menor a 3000 lb/pg^2 , dependiendo de la clase de cemento que se esté probando, con el fin de simular las condiciones del fondo del pozo durante el fraguado. Después del curado, los cubos se prueban con un equipo hidráulico de resistencia a la compresión. La velocidad a la cual se aplica la carga al cubo en el equipo hidráulico puede alterar los resultados obtenidos de resistencia a la compresión; el API recomienda un rango de velocidad de carga de $1,000$ a $4,000 \text{ lb/pg}^2$ por minuto. El equipo que se utiliza para someter las muestras de lechada de cemento a condiciones de presión y temperatura, durante un tiempo determinado, es conocido con el nombre de cámara de curado y se muestra en la figura 2.4.



Figura 2.4 Cámara de curado.

Comportamiento reológico

Las propiedades reológicas que se determinan a una lechada de cemento a nivel laboratorio, son: 1) viscosidad plástica (μ_p); 2) punto de cedencia (τ_y); 3) índice de consistencia (k'); y 4) índice de comportamiento de flujo (n'); propiedades que sirven para determinar el tipo de patrón de flujo de la lechada, requerido durante el trabajo de cementación. La viscosidad plástica y el punto de cedencia, son propiedades muy importantes para determinar el comportamiento de flujo de la lechada de cemento durante la operación de bombeo hacia el pozo. Una lechada con un valor bajo de viscosidad tiende a desarrollar demasiada agua libre cuando permanece estática, lo que provoca un asentamiento excesivo de las partículas sólidas del cemento; en caso contrario, cuando la lechada tiene un valor alto de viscosidad, se dificulta la operación de bombeo, requiriéndose mayor potencia de las bombas e incrementándose las caídas de presión por fricción. Mientras que, el punto de cedencia nos indica la magnitud de la fuerza requerida para mover una lechada en estado de reposo, por lo que es recomendable tenerlo en un valor bajo. Es necesario controlar los parámetros indicados, mediante la variación de la cantidad de agua de mezclado o con el uso de aditivos químicos, con el fin de

alcanzar flujo laminar por el interior de la tubería y flujo turbulento o tapón a través del espacio anular, entre agujero y tubería; es lo recomendado para remover el enjarre del lodo de perforación formado en las paredes del pozo, logrando así, tener una mejor adherencia del cemento con la formación, además de evitar problemas de canalización y migración de fluidos entre formaciones. Para determinar las propiedades reológicas de la lechada, se debe utilizar un equipo con las características siguientes: viscosímetro rotacional capaz de medir esfuerzos de corte contra velocidad de corte en un intervalo cercano a cero; hay que tener presente que una lechada de cemento se comporta como un fluido no Newtoniano, es decir, el esfuerzo de corte no es proporcionalmente lineal a la velocidad de corte, como sucede con un fluido Newtoniano.

Densidad de la lechada de cemento

Esta es una de las propiedades más importantes de una lechada de cemento, debido a que de su magnitud dependerá la carga hidrostática que se ejercerá sobre la formación. El valor de la densidad obtenida en el laboratorio, deberá compararse con el valor calculado en el diseño de la lechada de cemento. Si este valor no se encuentra dentro de la tolerancia adecuada, se tendrá que volver a diseñar la lechada de cemento, tomando en cuenta las posibles modificaciones en las demás propiedades físicas de la lechada. La densidad de la lechada de cemento debe determinarse mediante el uso de una balanza de lodo, descrita en el API-RP-13B, siguiendo el procedimiento recomendado.

Se presenta en forma resumida el equipo de laboratorio utilizado para la evaluación física y química del cemento, además de los procedimientos de prueba aplicados para cada determinación (tabla 2.3).

Prueba realizada	Equipo utilizado	Procedimiento aplicado
Tiempo de espesamiento	Consistómetro atmosférico Consistómetro presurizado	API Spec 10
Pérdida de agua	Filtro prensa (malla 325)	API Spec 10
Resistencia a la compresión	Cámara de curado Analizador ultrasónico	API Spec 10
Comportamiento reológico	Viscosímetro rotacional Reómetro de flujo en tubería	API Spec 10
Agua libre	Probeta graduada de 250 ml	API Spec 10
Expansión	Barra moldeada Manga cilíndrica	ASTM C 151 Spangle, 1983
Composición mineralógica	Método químico por la vía húmeda XRD*, XRF*, AA*, ó ICP*, aplicando ecuaciones de Bogue	Aldridge, 1982
Blaine	Permeabilímetro Blaine Turbidímetro Wagner BET* Dispersión de luz láser	ASTM C 204 ASTM C 115 Brunauer, et al, 1938 Wertheimer y Wilcock, 1976
Gravedad específica	Matraz Le Chatelier Picnómetro	ASTM 188, C 114
Análisis químico Vía seca	Espectrofotometría de absorción UV* XRD, XRF Microscopio óptico	ASTM C 114 Simpson, 1988 Reeves, 1983
Análisis químico Vía húmeda	Método químico vía húmeda AA, ICP	API RP 45 Simpson, 1988

* XRD Difracción de rayos-X; XRF Fluorescencia de rayos-X; BET Brunauer-Emmett-Teller
Uv Ultravioleta; AA Absorción atómica; ICP Emisión de plasma

Tabla 2.3 Equipo utilizado para la evaluación física y química del cemento o en su caso lechada de cemento.

Especificaciones físicas y químicas del cemento clase H

El American Petroleum Institute (API), estableció una normatividad para estandarizar y especificar las pruebas realizadas al cemento utilizado en la industria petrolera, en la cementación de pozos, logrando tener con esto, un control de la calidad del cemento. Esta normatividad se ha desarrollado utilizando condiciones promedio de datos tomados de pozos de la parte sureste de los Estados Unidos de América y algunas regiones del Golfo de México. La mayor parte de los cementos empleados en Ingeniería Petrolera, a nivel mundial, se manufacturan para cumplir con las especificaciones establecidas por el API y aunque esta normatividad es el resultado de extensos e importantes estudios se

han presentado problemas en las operaciones de cementación que son inherentes a la calidad que presenta el cemento.

Las normas permiten establecer las condiciones y requerimientos que deben reunir los cementos durante el proceso de aplicación de lechadas, pero las condiciones de los pozos, las características específicas de fabricación y principalmente las materias primas utilizadas para la fabricación del cemento, en México y en otras partes del mundo son distintas a las que se consideraron para establecer la normatividad API.

Petróleos Mexicanos conjuntamente con el Instituto Mexicano del Petróleo han desarrollado estudios de investigación encaminados a la obtención de resultados que permitan el establecimiento de normas específicas aplicables a la industria petrolera nacional, para el control en forma más estricta, de la calidad de los cementos empleados en pozos petroleros, bajo una amplia variedad de condiciones de presión y temperatura. El resultado de las investigaciones desarrolladas es la "Norma de control de calidad del cemento empleado en la cementación y recementación de tuberías de revestimiento, PEMEX-IMP 2/93".

En las tablas 2.4 y 2.5 se presentan, en forma comparativa, las especificaciones físicas y químicas, establecidas por el API (Specification for Materials and Testing for Well Cements, API SPECIFICATION 10-SPEC 10) y las especificadas por PEMEX-IMP, para la fabricación de un cemento clase H. Se presenta solamente el cemento clase H, incluso es el recomendado para utilizarse en las prácticas actuales de cementación de pozos, debido a que en general, es el que presenta un mejor comportamiento solo y en presencia de los aditivos químicos comúnmente empleados en la Industria Petrolera Mexicana.

2.3 Aditivos para cementos y su efecto en el tiempo de fraguado²

En cementaciones de pozos, los cementos Portland especiales son diseñados de rutina para temperaturas aproximadamente de 350°C en recuperación térmica y pozos geotérmicos. Encontrando rangos de presión cercana a la atmosférica en pozos someros y más de 30,000 psi en pozos profundos. Considerando las diferentes temperaturas y presiones, las cementaciones de los pozos son diseñadas para trabajar con formaciones porosas o débiles, fluidos corrosivos y fluidos de formaciones sobrepresionadas. Ha sido posible diseñar tales con un rango amplio de condiciones por medio del desarrollo de aditivos para cementos. Los aditivos modifican el comportamiento del cemento, permitiendo la colocación fácil de la lechada del cemento entre la tubería y la formación, desarrollando una rápida resistencia compresiva y una adecuada zona aislada durante el tiempo de vida del pozo.

Actualmente, más de 100 aditivos para cementar pozos están disponibles, muchos de los cuales pueden ser suministrados en forma sólida o líquida. Cada categoría de aditivos esta generalmente reconocida. A continuación se da una breve descripción:

- **Aceleradores:** Son compuestos químicos que reducen el tiempo de colocación de un cemento.
- **Retardadores:** Son compuestos químicos que extienden el tiempo de colocación de un cemento.
- **Extendedores:** Son materiales que reducen la densidad de un cemento y/o reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen de producto colocado.
- **Agente densificante:** Son materiales que aumentan la densidad de un cemento.
- **Dispersantes:** Son compuestos químicos que disminuyen la viscosidad de una lechada de cemento.
- **Agentes de control de pérdida de fluido:** Son materiales que controlan la pérdida de la fase acuosa de un cemento hacia la formación.

Determinación	Especificaciones	
	PEMEX-IMP	API-SPEC-10
Análisis Físico		
Densidad (g/cc)	3.14±0.02	*
Humedad (%)	0.4 mínimo 0.6 máximo	*
Area de superficie específica (cm ² /g)	2,700±50	*
Tamaño de partícula (micras)	15 mínimo 25 máximo	*
Requerimiento de agua (%)	38	38
PH de la lechada de cemento	11 mínimo	*
Densidad de la lechada (g/cc)	1.98±0.01	*
Agua libre (ml)	3.5 máximo	3.5 máximo
Tiempo bombeable en cédula 5 (min.)	90 mínimo 120 máximo	90 mínimo 120 máximo
Propiedades reológicas		
Viscosidad plástica (cp)	35 mínimo 60 máximo	*
Punto de cedencia (lb/100pie ²)	65 máximo	*
Resistencia a la compresión		
8 hrs. A temp.=38°C y presión atm. (lb/pg ²)	300 mínimo	300 mínimo
8 hrs. A temp.=60°C y presión atm. (lb/pg ²)	1,500 mínimo	1,500 mínimo

*No especificadas

Tabla 2.4 Especificaciones físicas para el cemento clase H.

Determinación	Especificaciones	
	PEMEX-IMP (% en peso)	API-SPEC-10 (% en peso)
Análisis químico		
Óxido de magnesio (MgO)	2.0 máximo	6.0 máximo
Trióxido de azufre (SO ₃)	3.0 máximo	3.0 máximo
Pérdida por ignición (PI)	1.5 máximo	3.0 máximo
Residuos insolubles (RI)	0.5 máximo	0.75 máximo
Cal libre (CaO)	0.5 máximo	*
Contenido de álcalis totales (Na ₂ O)	0.6 máximo	0.75 máximo
Silicato tricálcico (C ₃ S)	65 máximo 58 mínimo	65 máximo 48 mínimo
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	3 máximo	3 máximo
Aluminoferrita tetracálcica (C ₄ AF)	15 máximo	24 máximo

*No especificado

Tabla 2.5 Especificaciones químicas para el cemento clase H.

- **Agentes para el control de pérdida de circulación:** Son materiales que controlan la pérdida de la lechada de cemento a una formación débil o vugular.
- **Aditivos especiales:** Son diversos aditivos entre los que encontramos antiespumantes, fibras, etc.

Para efecto del objetivo de esta tesis, solo se consideran los aditivos que tienen influencia importante en el tiempo de fraguado.

Retardadores

El mecanismo de acción del retardador de un cemento Portland es aun una materia de controversia. Son varias las teorías que han sido propuestas pero ninguna ha sido capaz de explicar totalmente el proceso de retardo del mismo. Dos factores principales pueden ser considerados: La naturaleza química del retardador y la fase del cemento (silicato o aluminato) sobre la cual el retardador actúa. Cuatro teorías principales han sido propuestas y se resumen a continuación:

- **Teoría de adsorción:** El retardo es debido a la adsorción del retardador sobre la superficie de hidratación de los productos, de este modo inhibe el contacto con el agua.
- **Teoría de precipitación:** El retardador reacciona con el calcio y/o iones hidróxilos en la fase acuosa, formando una capa insoluble e impermeable alrededor de los granos del cemento.
- **Teoría de nucleación.** El retardador se absorbe sobre el núcleo los productos de hidratación, inhibiendo su futuro crecimiento.
- **Teoría de complejidad:** Los iones de calcio son inhibidos por el retardador, mediante la formación de complejos que evitan la formación del núcleo.

Es posible que todos de los efectos anteriores están implicados en algún limite en el proceso de retardo. A pesar de la incertidumbre observada en el mecanismo de

retardo, la tecnología esta muy bien desarrollada. Algunas clases de retardadores se mencionan a continuación:

Lignosulfonatos

Los retardadores más comúnmente usados para cementación de pozos son las sales de sodio y calcio de ácidos lignosulfónicos. Los lignosulfonatos son polímeros derivados de la pulpa de la madera; por tanto, están usualmente sin refinar y contienen cantidades de compuestos sacáridos. El peso molecular promedio varía de alrededor de 20 000 a 30 000. Después de purificar los lignosulfonatos pierden mucho de su poder retardador, la acción retardadora de colocación de esos aditivos es frecuentemente atribuida a la presencia de carbohidratos de bajo peso molecular³ así como pentosas (xilosa y arabinosa), hexosas (mannosa, glucosa, fructuosa, rhamnosa y galactosa), y por ácidos aldónicos (especialmente ácidos xilónicos y glucónicos).

Los retardadores lignosulfonados son efectivos con todos los cementos Portland y son generalmente adicionados en concentraciones de 0.1 a 1.5 % por peso de cemento. Dependiendo de su contenido carbohidrato y su estructura química (por ejemplo distribución de peso molecular, grado de sulfonación, etc.), y de la naturaleza del cemento, estos son efectivos a temperaturas de circulación del fondo del pozo de alrededor de 122°C. El rango efectivo de temperatura de los lignosulfonatos puede ser extendida a 315°C, cuando son mezclados con borato de sodio.

Los retardadores a base de lignosulfonatos predominantemente afectan la cinética de hidratación de silicato tricálcico (C_3S); sin embargo, sus efectos sobre la hidratación del aluminato tricálcico son significantes (Stein, 1961; Angstadt y Hurley, 1963). El mecanismo de retardo de los lignosulfonatos es generalmente debido a la combinación de las teorías de Adsorción y de nucleación.

Los retardadores a base de lignosulfonato se desempeñan mejor en cementos con baja cantidad de aluminato tricálcico (C_3A). Cuando el C_3A es hidratado en presencia de aditivos orgánicos como el lignosulfonato, la concentración de la solución decrece. Los productos de hidratación del C_3A inicialmente tienen un poder mucho mayor que los del C_3S^4 .

Ácidos hidroxicarboxílicos

Los ácidos hidroxicarboxílicos contienen grupos hidroxil y carboxil en sus estructuras moleculares. Sales de gluconato y glucoheptanato son los materiales más ampliamente usados en esta categoría. Estos tienen un alto poder de retardo y pueden fácilmente causar un sobreretardo a temperaturas de circulación del fondo del pozo menores a $93^\circ C$. Esos materiales son eficientes a temperaturas de aproximadamente de $150^\circ C$.

Otro ácido hidroxicarboxílico con un poderoso efecto de retardo es el ácido cítrico y es normalmente usado en concentraciones entre 0.1 a 0.3 % peso de cemento.

La acción de retardo por ácidos hidroxicarboxílicos y sus sales es generalmente atribuido a la presencia de grupos hidroxicarboxílicos alfa o beta, los cuales son capaces de inhibir un catión metálico como es el calcio.

Similarmente a los lignosulfonatos los ácidos hidroxicarboxílicos actúan más eficientemente con cementos bajos en C_3A .

Compuestos sacáridos

Los compuestos sacáridos (llamados azúcares) son conocidos como excelentes retardadores del cemento Portland. Los mejores retardadores en esta categoría son la sucrosa y la refinosa⁵. Estos compuestos no son comúnmente empleados

en cementación de pozos debido a que el grado de retardo es muy sensible a pequeñas variaciones en la concentración.

La acción de retardo de los compuestos sacáridos ha sido investigada ampliamente y ha mostrado ser dependiente sobre la susceptibilidad de los compuestos a degradación por hidrólisis alcalina.

Derivados de celulosa

Los polimeros de celulosa son polisacáridos derivados de la madera u otros vegetales, y son estables a las condiciones alcalinas de las lechadas de cemento. El comienzo del retardo es probablemente el resultado de la adsorción del polímero dentro de la superficie hidratada del cemento.

El retardador de celulosa más común es la carboximetilhidroxietilcelulosa (CMHEC) (Shell y Wynn, 1958). Es un efectivo retardador a temperaturas arriba de 120°C (Rust y Wood, 1966).

Un número de efectos secundarios son observados con el CMHEC. Es frecuente usarlo como agente para el control de pérdida de fluido. Además, el CMHEC incrementa significativamente la viscosidad de la lechada.

Organofosfatos

El ácido alqueno fosfático y sus sales han sido recientemente identificados como un aditivo retardador para cementaciones de pozos. Son efectivos a temperaturas de circulación mayores de 204°C (Nelson, 1984 y 1987; Sutton, 1985). Los organofosfatos son ventajosos para aplicaciones de cementaciones de pozos debido a su aparente insensibilidad a pequeñas variaciones en la composición del cemento y a su tendencia a bajar la viscosidad de las altas densidades de la lechada de cemento. Se conoce muy poco sobre el mecanismo de acción; sin

embargo, es probable que los grupos fosfonato actúen dentro de la superficie hidratada del cemento mucho mejor que otros tipos de retardadores.

Compuestos inorgánicos

Muchos compuestos inorgánicos retardan la hidratación del cemento Portland. Las mejores clases de materiales son listadas a continuación:

- Ácidos y sales tales como: bórico, fosfórico, hidrofluórico y crómico..
- Cloruro de sodio en concentraciones >20% por peso de agua.
- Oxido de cinc.

En cementaciones de pozos, el óxido de cinc es algunas veces usado como retardador de cementos tixotrópicos. El efecto de retardo del óxido de cinc es atribuido a la precipitación del hidróxido de cinc sobre los granos del cemento⁶. El hidróxido de cinc tiene una solubilidad baja ($K= 1.8 \times 10^{-14}$) y es depositado como un gel coloidal; consecuentemente, la capa tiene baja permeabilidad. El efecto de retardo finaliza cuando el hidróxido de cinc gelatinoso eventualmente se transforma a hidroxisilicato de calcio cristalino.

El tetraborato de sodio decahidratado es comúnmente usado como una ayuda al retardador. Este tiene la habilidad de extender los rangos de temperatura de los lignosulfonatos a más de 315°C; sin embargo, este puede ser perjudicial a la efectividad de los aditivos para pérdida de fluido poliméricos y celulósicos.

2.4 Cementos tixotrópicos²

Cuando las zonas cavernosas o vugulares son grandes y por consecuencia los agentes puenteadores son inefectivos, las lechadas de cemento tixotrópico son frecuentemente recomendadas. **Cuando tal lechada entra a la formación, esta**

no estará sujeta a esfuerzo, y como resultado, gelará generando una estructura de reticulación de autosoporte.

La tixotropía es un término usado para describir la propiedad exhibida por un sistema fluido bajo la aplicación de un esfuerzo, que desarrolla una estructura de gel y llega a soportar a la misma cuando esta en reposo (Shaw, 1970). En términos prácticos, las lechadas de cemento son delgadas y fluidas durante el mezclado y desplazamiento, pero rápidamente forma una estructura de gel que a sí misma se soporta cuando el bombeo cesa. En la reagitación, la estructura de gel se rompe y la lechada de nuevo es fluida y bombeable. Después, en el cese del esfuerzo, la estructura de gel reaparece y la lechada se vuelve a soportar a sí misma. Este tipo de comportamiento reológico es continuamente reversible con cementos tixotrópicos.

Como regla de una primera aproximación, las lechadas tixotrópicas se comportan como fluidos plásticos de Bingham bajo un esfuerzo, por consecuencia su comportamiento puede ser definido por un valor de cedencia (τ_y) y una viscosidad plástica (μ_p)⁷. El punto de cedencia es un valor teórico concerniente al comportamiento de un fluido bajo condiciones de esfuerzo. Con lechadas tixotrópicas, el punto de cedencia será el esfuerzo de corte necesario para iniciar el movimiento.

Para fluidos no tixotrópicos, el valor de cedencia permanece igual si la razón del esfuerzo es incrementada o disminuida. No existen cambios en la estructura física del fluido durante el periodo estático, y la presión necesaria para poner en movimiento el fluido no cambia con el tiempo. En el caso de fluidos tixotrópicos, el punto de cedencia es exhibido únicamente cuando el esfuerzo de corte es retirado. Si existe un lapso de tiempo, una gran fuerza indicada por el punto de cedencia será requerida para poner el fluido en movimiento, como el indicado en la figura 2.5. La diferencia entre la fuerza de gel y el punto de cedencia da una medida del grado de tixotropía del fluido.

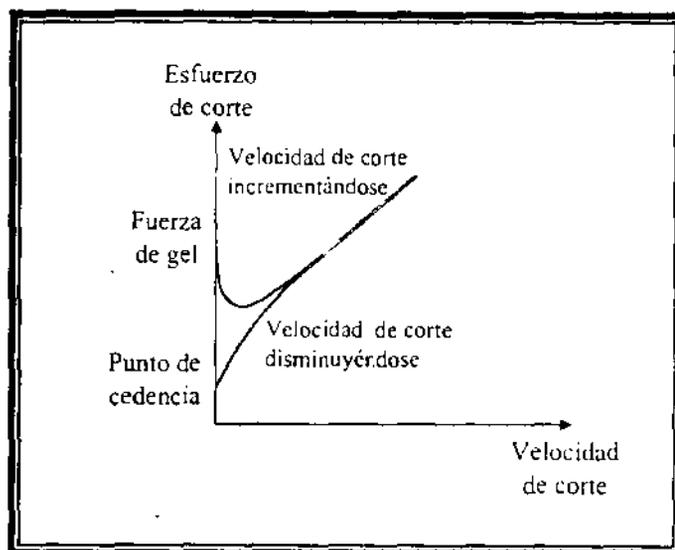


Figura 2.5 Comportamiento reológico generalizado de los fluidos tixotrópicos

Los sistemas de cementos tixotrópicos tienen varias aplicaciones. Son usados en pozos donde un excesivo retroceso de la columna de cemento es algo común⁸. Tales pozos tienen zonas débiles que se fracturan bajo una presión hidrostática baja. El autoaporte del cemento debido al incremento de la fuerza de gel reduce la presión hidrostática a la formación previniendo el retroceso de la columna.

Otra aplicación importante es el tratamiento de las pérdidas de circulación durante la perforación. Cuando una lechada de cemento entra a la zona de pérdida, la velocidad del borde inicial disminuye y la estructura del gel comienza a desarrollarse. Eventualmente, dicha zona comienza a taparse por el incremento de la resistencia del flujo. Una vez que el cemento es colocado, la zona es efectivamente consolidada.

Otros usos de los sistemas de cementos tixotrópicos son los siguientes: reparación de tuberías de revestimiento partidas o corroidas; como lechada guía para remediar cementaciones donde es difícil obtener una presión forzada; como

un mortero, en circunstancias donde este es deseable para que la lechada se convierta rápidamente inmóvil y prevenga la migración de gas.

Las lechadas de cementos tixotrópicos tienen otra notable característica. Después de cada ciclo dinámico-estático, el gel y punto de cedencia tienden a incrementarse. Durante las operaciones de cementación esto puede parecer un problema porque, después del reposo, puede requerir una presión excesiva de bombeo para reiniciar el movimiento. Por esta razón, muchos operadores tratan de evitar un prolongado cese de la operación cuando están bombeando esos sistemas.

Existen varios sistemas de cementos tixotrópicos. La química y consideraciones especiales de operación son descritas a continuación:

Sistema base arcilla

Los sistemas de cemento Portland que contienen arcillas que se expanden al contacto con el agua (como la bentonita) desarrollan fuerzas de gel y exhiben cierto grado de comportamiento tixotrópico (Messenger, 1980). Estos sistemas han mostrado un control de la migración del gas. La concentración de bentonita y la densidad de la lechada puede variar de 0.05% a 2% por peso de cemento y 11.5 a 21 lb/gal (1.4 a 2.5 g/cc) respectivamente.

Sistema base sulfato de calcio

El material más ampliamente usado para preparar lechadas de cemento tixotrópico es el sulfato de calcio semihidratado (también llamado plaste de Paris). Cuando este material es adicionado al cemento Portland, este primero se hidrata para formar yeso y luego reacciona con el aluminato tricálcico para formar un sulfoaluminato cálcico hidratado, mineral llamado "estringita".

La presencia de cristales de estrigita promueve una gran asociación física entre las partículas del cemento, resultando la formación de un gel. Volviendo a agitar, la estructura es fácilmente dispersada y la lechada regresa a su estado de fluido. Muchos cementos Portland pueden ser usados para preparar cementos tixotrópicos con sulfato de calcio semihidratado la concentración óptima de este componente varia entre el 8 y 12 %. Los cementos con un contenido de aluminato tricálcico menor del 5 % no se recomiendan para preparar cementos tixotrópicos debido a que la insuficiente estrigita puede cristalizar a la tixotropía. La cantidad de agua requerida para las lechadas que contienen sulfato de calcio semihidratado es mayor que para un sistema convencional, consecuentemente, la densidad de la lechada es menor. En la tabla 2.6 se presentan los datos representativos para cada sistema:

Sistema	ρ (lb/gal l)	% Agua	Agua (gal/saco)	% de sulfato de calcio semihidratado	% CaCl ₂	Rendto (pie ³ /saco)	Temp BHCT (F)	Temp BHST (F)	Tiempo de esp.(Hr:min)
1	15.6	46	5.20	0	0	1.18	113	170	4:00
2	14.9	60	6.78	12	3	1.48	70	60	3:10
3	14.6	64	7.20	10	2	1.50	80	95	2:08
4	14.6	64	7.20	12	3	1.54	80	95	1:50
5	14.2	70	7.90	10	0	1.60	125	200	3:15

Tabla 2.6 Propiedades de las lechadas de cemento y desarrollo de las lechadas tixotrópicas que contienen sulfato de calcio semihidratado.

Los cementos tixotrópicos que contienen sulfato de calcio semihidratado no son compatibles con muchos aditivos para el control de perdidas de filtrado. Para proveer un adecuado control del filtrado, las lechadas son usualmente precedidas por un espaciador con un aditivo para el control del filtrado (Warembourg et al., 1980). Por otro lado, estos sistemas son altamente resistentes a los sulfatos, porque el aluminato tricálcico es efectivamente neutralizado.

Sistema sulfato de fierro(II)/sulfato de aluminio

Un aditivo compuesto de la mezcla de sulfato de fierro y de sulfato de aluminio también imparte tixotropía a las lechadas de cemento. Este sistema fue desarrollado para cementos Portland los cuales contenían menos del 5% de aluminato tricálcico. El material es también efectivo con cementos que no son Portland, como son los cementos clase J. Estos pueden ser suministrados en forma líquida, la cual es conveniente para operaciones costa afuera.

El sulfato de aluminio es un acelerador muy poderoso del cemento, pudiendo desarrollar una estructura de gel fuerte e irreversible si es adicionado solo. El sulfato de fierro (II), es un débil retardador del cemento, es incluido en el sistema para inhibir al sulfato de aluminio y preservar la tixotropía a lo largo del tiempo bombeable. Debido a la rápida cinética de este sistema, muy poca estrigita esta formada después de la colocación del cemento. Lo cual significa que la expansión del cemento no es observada excepto a temperaturas de curado por abajo de 100°F (38°C).

Sistema polimérico celulósico reticulado

Los cementos tixotrópicos pueden ser preparados por la adición de polímeros reticulables en agua soluble y un agente reticulante⁹. Hidroxietilcelulosa (HEC), carboximetilhidroxietilcelulosa (CMHEC), alcohol polivinílico y varios polímeros sulfonados pueden ser reticulados con titanio o circonio. La óptima combinación de polímero/reticulador, y las concentraciones de cada uno varía dependiendo de la temperatura del pozo.

2.5 Proceso de cementación convencional¹⁰

Objetivos de una cementación

Hay muchas razones para la cementación de la tubería de revestimiento, pero las listadas son las más importantes. Es necesario revisar estas razones antes de la planeación y ejecución de una cementación. Las razones por las cuales se debe cementar una tubería son las siguientes:

- Reforzar y proteger todas las sartas de tubería.
- Controlar el pozo durante el resto de la perforación.
- Aislar las zonas productoras.
- Facilitar tratamientos del pozo.
- Asegurar una producción sin problemas.

Aún cuando una "situación ideal" de cementación nunca ocurre, todos los esfuerzos deberán ser hechos para buscar esta condición tanto como sea posible. La tubería de revestimiento debe ser rodeada de una cubierta de cemento de espesor suficiente y centrada en el agujero del pozo. De esta manera la tubería de revestimiento es sostenida y la migración de fluido o gases es evitada por la adherencia del cemento a ambos, la tubería de revestimiento y la formación.

Ejemplos de fracasos en las cementaciones

La determinación de las razones específicas de los fracasos de las cementaciones hace más sencilla la tarea de resolver los problemas y encontrar fácilmente las soluciones. Entre las razones de los fracasos de cementaciones tenemos los siguientes:

- Fraguado instantáneo y/o pérdida de cemento.
- Canalizaciones del cemento a través del lodo.

- Migración de agua y/o gas a través del cemento fraguado.
- No hay unión de la formación y la tubería de revestimiento.
- Daños por la tubería de perforación o disparos.
- Movimiento de sal plástica.

La figura 2.6 muestra la canalización típica de cemento donde la tubería de revestimiento descansa contra un lado del agujero del pozo. Hay un exceso de enjarre de lodo, y una película de éste se ha adherido a la tubería de revestimiento. En estas condiciones, aún si el cemento ha cubierto el espacio anular, ninguna adherencia será posible.

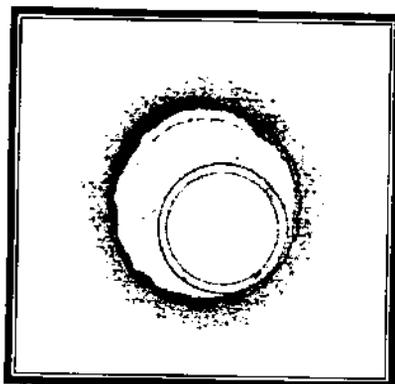


Figura 2.6 Canalización típica del cemento

Cuando la tubería de revestimiento no es centrada en el agujero del pozo, el lodo desvía al cemento. Además se forman deslaves con acumulación de lodo gelatinoso y recortes. El excesivo aumento de enjarre puede ser visto en las dos zonas permeables.

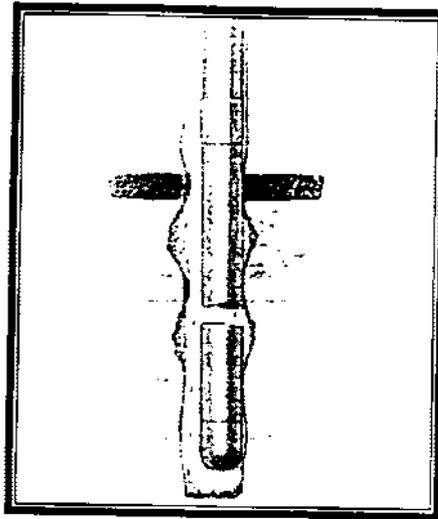


Figura 2.7 Tubería de revestimiento excéntrica

La excentricidad de la tubería de revestimiento en el agujero evita una distribución uniforme del cemento, y por lo tanto, la historia del pozo típico deberá ser: pozo perforado (disparos); producción libre de agua; presión del yacimiento reducido por producción continua; aumento de presión diferencial entre estas dos zonas; migración de agua a la zona de producción. Teniendo como resultado un incremento en los costos de producción y una costosa y perjudicial cementación forzada.

El gas puede migrar a través del cemento fraguado formando canales al lado de la formación ó de la tubería de revestimiento, donde no hubo adherencia del cemento, ó a través del lodo abandonado en el espacio anular. Esto dará por resultado problemas, tales como una relación gas/aceite indeseable, el ataque de zonas permeables, ya sea por agua, aceite ó gas, ó una inconveniente presión de gas en el espacio anular entre la tubería de producción y la tubería de revestimiento intermedia.

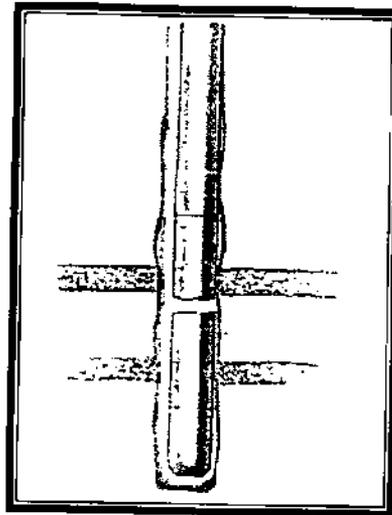


Figura 2.8 Migración de gas a través del cemento

Las restricciones en los pozos perforados son debido a la formación de enjarre de lodo ó cemento. El resultado es un aumento en la presión del espacio anular bajo el intervalo restringido, el cual puede causar fracturamiento de formaciones débiles y pérdidas de lodo ó cemento. Estas restricciones impiden al cemento cubrir el horizonte productor.

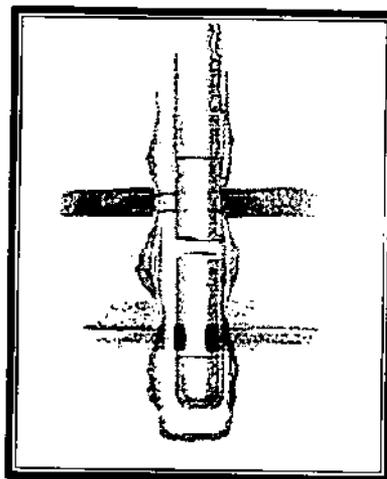


Figura 2.9 Fracturamiento de formaciones débiles

Una alta presión de bombeo, un fraguado rápido del cemento y pérdida de circulación, son los resultados de un espacio anular no controlado. Los grados de desarrollo donde el pozo perforado se restringe alrededor de la tubería de

revestimiento se muestran en la figura 2.10. Note el plano del estrato siendo forzado a abrir, introduciendo lodo ó cemento.

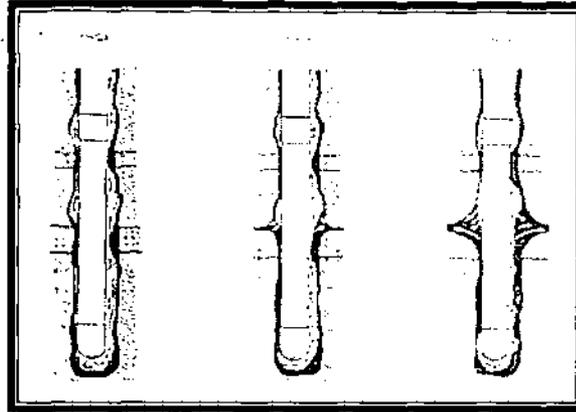


Figura 2.10 Ejemplos de espacio anular no controlado

La tubería de revestimiento mal cementada es vulnerable a los sacudimientos y vibraciones producidas por una perforación prolongada y disparos. Debido a las cementaciones pobres, pueden resultar altos costos de reparación ó aún la pérdida completa de pozos, por causa de tramos de tubería desprendidos.

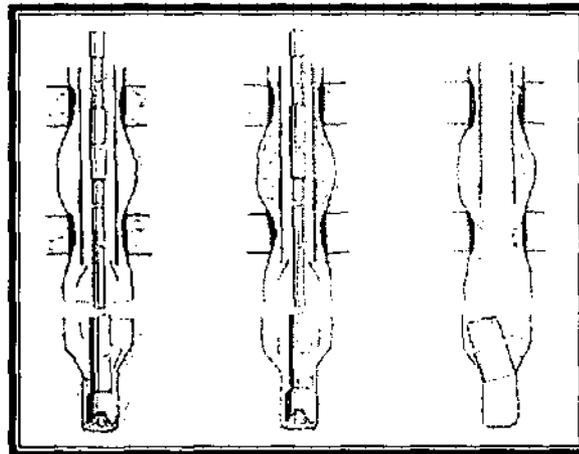


Figura 2.11 Tubería de revestimiento mal cementada

Después de que la cementación ha sido cuidadosamente planeada con la ayuda de registros y la historia del pozo, la tubería de revestimiento es introducida al agujero. Se recomienda que la circulación se lleve a cabo por un breve periodo

antes de entrar al agujero abierto y circular en intervalos para eliminar el lodo muy gelatinizado y los sólidos.

2.6 Proceso de una cementación tixotrópica¹¹

Los sistemas de cementos tixotrópicos especialmente diseñados con frecuencia ayudan a la colocación del cemento para obtener un adecuado llenado de las áreas o sitios donde las lechadas convencionales no son exitosas.

Estas lechadas son delgadas cuando se mezclan inicialmente pero desarrollan altos esfuerzos de gelatinosidad casi inmediatamente después de la colocación. El propósito de los altos esfuerzos de gelatinosidad es hacer que la columna de cemento soporte el peso de la columna y así libere la presión hidrostática en el fondo de la columna.

Originalmente se desarrollo para prevenir la caída o el regreso de la columna de cemento en áreas de bajos gradientes de fractura, los sistemas tixotrópicos tienen una capacidad probada para resolver muchas dificultades y problemas de las cementaciones. Como ya se menciona tienen aplicación en el sellado de pérdidas de circulación o durante la reparación de agujeros en la tubería de revestimiento durante la perforación y también para reducir la entrada de gas de la columna de cemento durante las operaciones de cementación.

Los cementos tixotrópicos o los de fraguado regulado, se han usado exitosamente en muchos de los pozos actuales. Por otro lado su uso permite que las tuberías de revestimiento en las secciones de excesivas pérdidas de circulación se utilicen lechadas más selectivas y eficientes que puedan ser usados en los tratamientos de estimulación. Por esto cuando se realizan tratamientos de estimulación se tienen incrementos de producción que son de 2 a 3 veces mayores que en los pozos donde se usan lechadas convencionales.

Hay áreas donde los gradientes de formación de fractura son de tan bajas magnitudes lo que hace muy difícil la obtención de buenos trabajos de cementación. Estas formaciones son normalmente zonas de alto fracturamiento, zonas de lutitas, granitos lavados, depósitos glaciares, etc.

Cuando se usan sistemas de cemento convencional la combinación de la presión hidrostática y la presión debida a la fricción es de tal magnitud que en estas zonas se romperá el fondo y se necesitará más lechada de cemento.

Regularmente en los casos cuando la cantidad de cemento es grande y no se pierde a la formación durante su colocación, la columna de cemento retrocederá o regresará después de que el pozo es cerrado, esto deja grandes secciones de tubería sin cementar.

La práctica usual para el problema de fraguado completo bajo estas condiciones es la reducción de la densidad de la lechada de cemento. Esta práctica tiene varias desventajas debido a los límites de variación del peso del cemento.

Si la densidad de una lechada es reducida a su mínimo valor, su campo de esfuerzos y permanencia se reducen notablemente. Por otro lado, con la densidad en este valor, la presión hidrostática de una columna puede todavía exceder la presión crítica de la formación. En este caso, se requerirán varias etapas de cementación. Cada etapa de cemento tendrá que alcanzar una cierta solidez antes de ser colocada la siguiente, este método ha sido usado junto con las canastas retenedoras para posteriormente reducir la presión sobre la formación. Esta práctica en raras ocasiones tiene éxito e incrementa grandemente los costos de terminación.

Otro problema que surge con las lechadas de peso ligero es que propician la entrada de gas durante la colocación. Para prevenir esto, se aplica frecuentemente una contra presión en el espacio anular en un intento de

balancear la presión hidrostática en la base de la columna con la presión de formación. El resultado de esta práctica es un sobrebalance y una pérdida de la lechada a la formación.

El uso de bajos ritmos de desplazamiento para reducir las pérdidas por fricción puede algunas veces ayudar al llenado completo, pero no resuelve el problema del regreso de cemento. Práctica general en muchas áreas ha sido usar bajos ritmos de desplazamiento, permite una colocación inicial, y después cubrir la zona de la cima. El resultado normal de esta práctica es una pobre adherencia y resultados limitados de los tratamientos de estimulación.

Sistemas de cementación de fraguado regulado¹²

Para cubrir los problemas encontrados con las lechadas de cemento convencionales y las técnicas se intentó hacer un sistema de cemento que pudiera ser capaz de reducir la presión hidrostática mientras se tiene el estado de colocación. El sistema de cemento de fraguado regulado (RFC) esta diseñado con propiedades de viscosidad y gelatinosidad controladas. Cuando se inicia el mezclado con el agua la lechada es extremadamente delgada y muy fácilmente bombeable. Como la lechada es bombeada se irá incrementando la viscosidad hasta alcanzar un valor determinado. Cuando se coloca la lechada, se comienza a desarrollar una muy alta gelatinosidad en cuestión de segundos. Esta tendencia a la gelatinosidad hace que la columna de cemento se soporte a si misma por la adherencia en las paredes tanto del agujero como de la tubería. Por lo tanto la presión hidrostática en el fondo de la columna es liberada. **La gelatinosidad o las fuerzas de gelatinosidad pueden ser controladas en su ritmo de contrucción hasta obtener un valor máximo.**

Las lechadas de cemento de llenado regulado son tixotrópicas porque pueden ser removidas después de que las fuerzas de geletinosidad se desarrollaron si se aplica un alto esfuerzo de corte. Además, tienen baja movilidad porque no pueden

regresar o retroceder al fondo del anular debido a su peso. Estas fuerzas de gelatinosidad también minimizan la entrada de gas y eliminan la necesidad de la contrapresión durante la colocación en el anular.

Las lechadas de los sistemas de cemento de llenado regulado son mezclas de cemento portland y componentes de cemento de llenado regulado y agua. Una relación de estos componentes fue usada en una concentración de 1 parte de estos por cada 8 1/3 partes de cemento. Esto es equivalente a un 12% sobre la base del peso del cemento usado.

Para esta mezcla básica se adiciona agua en proporción de 50 a 75% del peso de cemento portland usado. Esta variación del contenido de agua permite el control de la viscosidad y en algún grado de las fuerzas de gelatinosidad y el tiempo de bombeo, así como de las fuerzas de colocación. En pozos someros alrededor de 5000 pies, las fuerzas de gelatinosidad y el ritmo de construcción de las fuerzas de gelatinosidad y el tiempo de colocación esta controlado hasta un grado de precisión mediante el uso de cloruro de calcio. Así una vez que el contenido de agua ha sido suficiente se usa el cloruro de calcio para incrementar el ritmo de construcción de las fuerzas de gel y acelerar el tiempo de colocación.

Las lechadas de cemento de fraguado regulado han sido probadas para cementos en pozos de aceite y que tengan una respuesta de manera predecible. La viscosidad y las fuerzas de gelatinosidad varían un poco con el uso de aditivos y cada operación de cementación puede ser diseñada para cada pozo en particular. El peso de la lechada será usualmente de 14.5 lb/gal. Las condiciones locales del pozo pueden requerir ligeras variaciones. El punto de cedencia y el peso de los sistemas de baja movilidad pueden ser variados sobre un amplio rango usando extendedores convencionales, pero las fuerzas de gelatinosidad y la construcción de las mismas serán dañadas en algún grado.

El uso de más agua de lo normal que el requerido por el sistema no causa separación cuando el cemento esta estático. Condición necesaria del desarrollo de geles en condición estática.

CAPITULO 3 DINÁMICA DE FLUJO PARA LAS LECHADAS DE CEMENTO

3.1 Proceso de Hidratación del cemento²

La hidratación del cemento Portland es una secuencia de reacciones químicas parciales entre los componentes del clinker, sulfato de calcio y agua, llevando a la lechada del cemento a un continuo espesamiento y endurecimiento. Aunque la hidratación del silicato tricálcico (C_3S) se usa frecuentemente como un modelo para la hidratación del cemento Portland, es de considerar que muchos parámetros adicionales están involucrados.

Desde el punto de vista químico, la hidratación del cemento Portland es un proceso complejo de disolución/precipitación en la cual, a diferencia de la hidratación de fases puras individuales, las diferentes reacciones de hidratación avanzan simultáneamente a diferentes velocidades. Las fases también influyen una con otra. Por ejemplo, la hidratación del aluminato tricálcico (C_3A) es modificada por la presencia del C_3S que se está hidratando, debido a la producción de hidróxido de calcio reforzando la acción retardadora del yeso. Ninguno de los minerales del clinker es puro. Dependiendo de la composición de los materiales sin preparar, cada uno contiene óxidos diferentes en solución sólida los cuales alteran su reactividad.

Los productos de la hidratación también son impuros. El gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) incorpora significantes cantidades de aluminio, hierro y sulfuro, mientras la etringita y monosulfoaluminato contienen silicón. El hidróxido de calcio también contiene pequeñas cantidades de iones extraños principalmente silicatos.

Un esquema termográfico típico de la hidratación del cemento Portland se muestra en la figura 3.1. Esta puede ser descrita aproximadamente como la adición del termograma para C_3S y C_3A ajustado para concentraciones relativas.

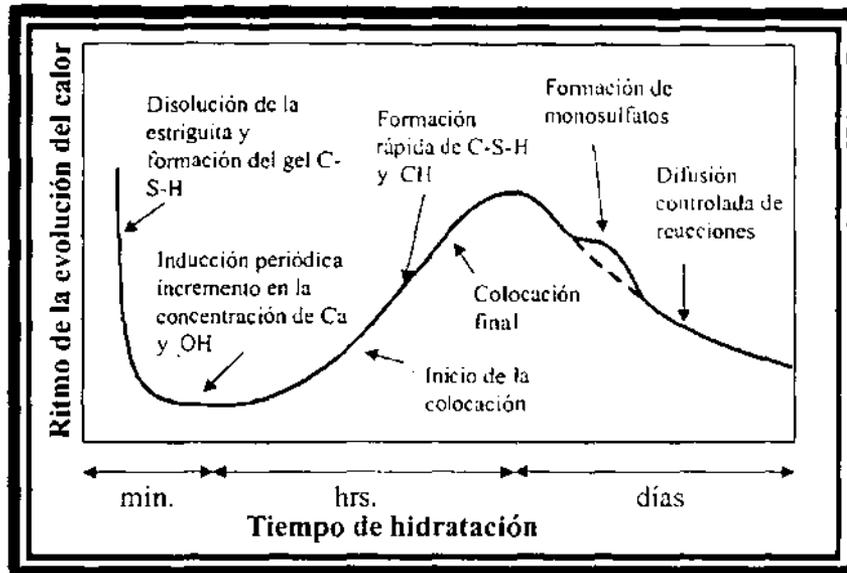


Figura 3.1 Representación esquemática de la hidratación del cemento Portland

Efecto de la temperatura en la química del cemento

El cemento Portland es esencialmente un material de silicatos de calcio, siendo los componentes más abundantes el silicato tricálcico (C_3S) y el silicato dicálcico (C_2S). Con la adición de agua, ambos se hidratan para formar un gel llamado C-S-H, el cual es responsable de la resistencia y estabilidad dimensional de la colocación del cemento a temperaturas ordinarias. Además del gel C-S-H, una cantidad sustancial de hidróxido de calcio (CH) es liberada.

El gel C-S-H es el primer producto de la hidratación al mismo nivel elevado de temperatura y presión, y es un excelente material de amarre a temperaturas del pozo menores de $110^\circ C$. A temperaturas mayores, el gel C-S-H está sujeto a metamorfosis, la cual da como resultado una disminución de la fuerza compresiva y un incremento de la permeabilidad de la colocación del cemento. Este fenómeno, conocido como retrogresión de la resistencia, fue reportado primero en la literatura petrolera por Swayze¹³ como un resultado tendiente hacia terminación de pozos profundos.

Frecuentemente, el gel C-S-H se convierte a una fase llamada hidrato de silicato dicálcico alfa (α -C₂SH). El α -C₂SH es altamente cristalino y mucho más denso que el gel C-S-H. Como resultado, ocurre un encogimiento el cual es dañino a la integridad de la colocación del cemento.

El problema de la retrogresión de la resistencia puede ser prevenida reduciendo el volumen de la relación cal-silica (relación C/S) en el cemento¹⁴. Para realizar esto, el cemento Portland es parcialmente reemplazado por una tierra de cuarzo, usualmente como una arena sílica fina o sílica fluor. En algunas áreas, cementos especiales están disponibles donde el cuarzo ha sido integrado con el clinker del cemento Portland¹⁵. En general, la colocación de la cementación la cual consiste predominantemente de hidratos de silicato de calcio con relación C/S menor o igual a 1 tienden a tener mayor resistencia compresiva y bajas permeabilidades de agua.

3.1.1 Evidencia experimental de la evolución estructural del cemento en el tiempo¹⁶

Con el propósito de comprobar que la viscosidad de las lechadas de cemento cambia con el tiempo debido a la reacción química, que provoca que las partículas que forman el cemento vayan agrupándose y creciendo, en el laboratorio de Perforación y Mantenimiento de Pozos del Instituto Mexicano del Petróleo de la Cd. de México se realizaron una serie de pruebas utilizando un equipo de dispersión de luz laser, el cual es capaz de medir el tamaño de la estructura de más de una fase de un material en forma dinámica. La limitante de esta técnica es que cada fase debe ser diferente ópticamente y el medio tiene que ser transparente a la longitud de onda del rayo laser. Esto significa en la práctica que el índice de refracción del material deberá ser diferente del medio en el cual esta soportado.

Principio de operación del equipo de dispersión de luz

El medidor de tamaño de partícula esta basado en la dispersión de luz laser. Este cae dentro de la categoría de sistemas de imagen no óptica debido al hecho de que la medición la realizan sin la formación de una imagen de la partícula sobre el detector.

El medidor maestro emplea dos formas de configuración óptica. El primer método óptico es llamado "Óptico convencional de Fourier" y el segundo es llamado "Óptico invertido de Fourier". El equipo de dispersión de luz a utilizar en la experimentación para obtener la concentración con respecto al tiempo de la lechada de cemento emplea el método "Óptico convencional de Fourier" para realizar las mediciones. La figura 3.2 muestra gráficamente el equipo antes mencionado.

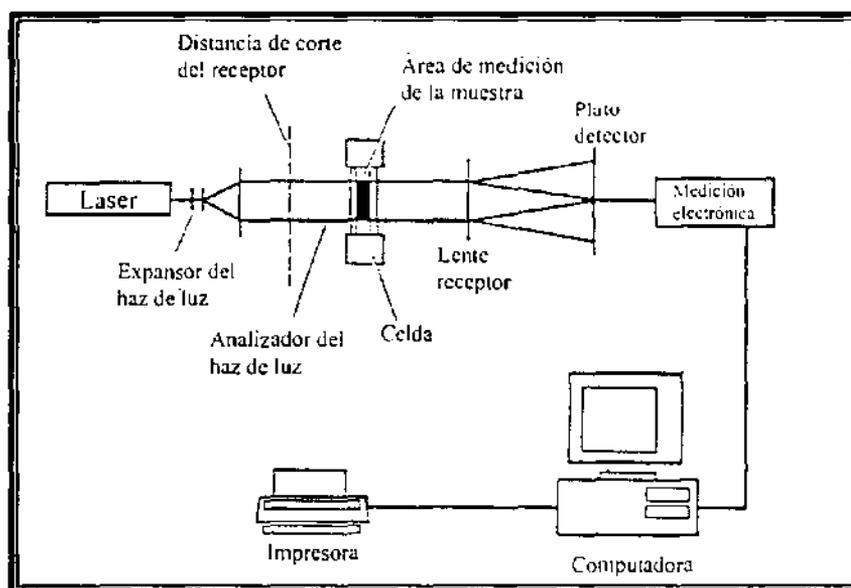


Figura 3.2 Equipo utilizado en la experimentación de dispersión de luz de la lechada de cemento

En la realización de las pruebas, se colocó una pequeña muestra de una lechada de cemento dentro de la celda del equipo, sirvió como medio el agua y se fue tomando a diferentes tiempos el tamaño de la partícula, como se observa en la figura 3.3, se pudo evidenciar el crecimiento y cambio estructural de las partículas

del cemento, sugiriendo el consecuente cambio de las propiedades reológicas en cada etapa de crecimiento en el tiempo.

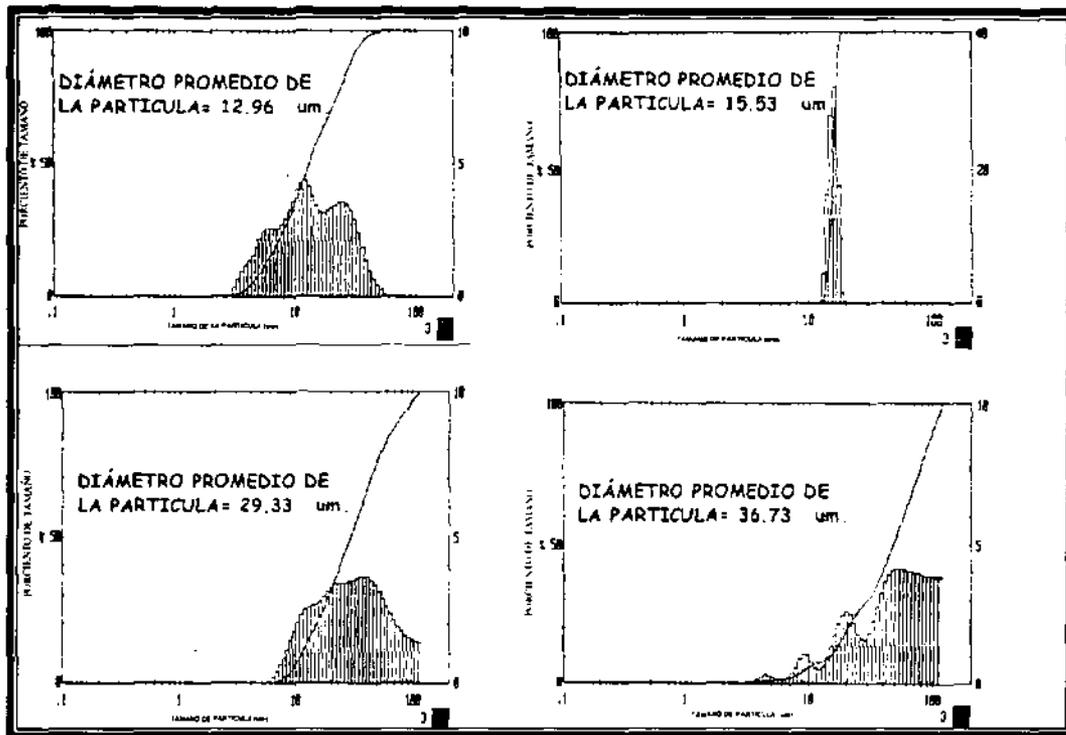


Figura 3.3 Crecimiento del tamaño de partícula de una lechada de cemento

3.2 Principios reológicos^{17,18}

El flujo de fluidos o sistemas de fluidos, a través de conductos circulares y espacios anulares, es uno de los aspectos más comúnmente encontrados en el campo de la ingeniería petrolera; especialmente en la perforación, terminación y reparación de pozos petroleros.

Por tanto, las características reológicas o flujo de los fluidos deberán de ser bien definidas, a fin de diseñar adecuadamente los requerimientos de potencia necesaria para circularlos.

Es posible obtener a partir de un estudio reológico o de las variaciones en sus propiedades reológicas el diseño de sistemas de fluidos y en el comportamiento de flujo a diferentes condiciones; así como el efecto de diversos contaminantes sobre los fluidos.

La mayoría de la teoría sobre reología trata con casos idealizados, basados en ecuaciones diferenciales de primer orden y sobre el concepto de que las constantes en esas ecuaciones no varían con los cambios en las variables involucradas.

Sin embargo, existen numerosas excepciones de los conceptos ideales; los cuales han sido matemáticamente desarrolladas. Por tanto, estos sistemas reológicos, llamados "anómalos", parecen ser aún más comunes que los sistemas ideales. Además, aún cuando la teoría sobre reología, cualitativa y cuantitativa, trata con fenómenos reversibles, a menudo se encuentra con la irreversibilidad.

Las ecuaciones que describen el flujo de cualquier fluido, son las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Estas no se pueden resolver sin suponer una ecuación constitutiva, que relacione la deformación del fluido con las fuerzas aplicadas.

Las ecuaciones que relacionan los esfuerzos de corte y las velocidades de corte son los modelos reológicos. Considerando que un fluido está contenido entre dos placas paralelas, una de las cuales está en movimiento con una velocidad V , como se muestra en la figura 3.4. El esfuerzo de corte τ representa la fuerza por unidad de área necesaria para provocar el flujo del fluido. La velocidad de corte o deformación γ es equivalente al gradiente de velocidad. La unidad de campo del esfuerzo es la $\text{lb}/100\text{pies}^2$ (0.4788 Pa).

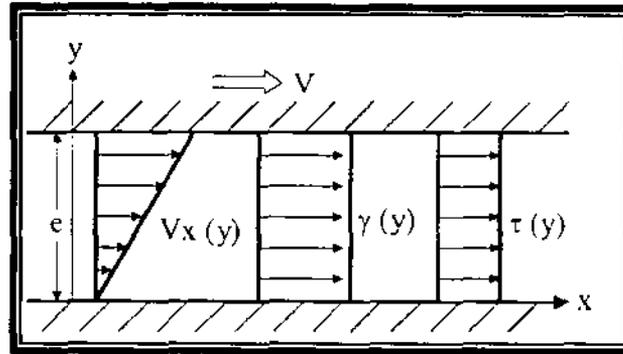


Figura 3.4 Flujo entre placas paralelas (placa superior en movimiento)

De acuerdo con su comportamiento bajo la acción de un esfuerzo cortante y la velocidad de corte inducida por dicho esfuerzo, los fluidos se clasifican como fluidos Newtonianos y fluidos no-Newtonianos.

Fluidos Newtonianos^{19, 18}

Un fluido responde en una forma muy distinta de cómo lo haría un sólido al esfuerzo aplicado. Un fluido sometido a un esfuerzo de tensión o cortante, se deformará continuamente, es decir fluirá, mientras que el esfuerzo continúe siendo aplicado (en el sólido se alcanzaba una deformación de equilibrio). Además, en un fluido no existe recuperación de la forma original, una vez que el esfuerzo es removido, como ocurre en el caso de un sólido Hookeano.

La relación reológica más simple para un fluido puramente viscoso fue definida por Newton en 1687 y corresponde a la Ley de Newton de la viscosidad, misma que se puede expresar como sigue:

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{dV_x}{dy} \dots\dots (3.1)$$

Fluidos no newtonianos

Aquellos fluidos que no obedecen la ecuación anterior son llamados no Newtonianos. Las manifestaciones de comportamiento no Newtoniano pueden dividirse en tres categorías:

- Fluidos no Newtonianos independientes del tiempo.
- Fluidos no Newtonianos dependientes del tiempo.
- Fluidos viscoelásticos.

A continuación se describen brevemente las principales características de estos tipos de comportamiento. La figura 3.5 muestra en forma resumida el comportamiento de estos modelos.

El caso de estudio de esta tesis es un fluido no Newtoniano dependiente del tiempo.

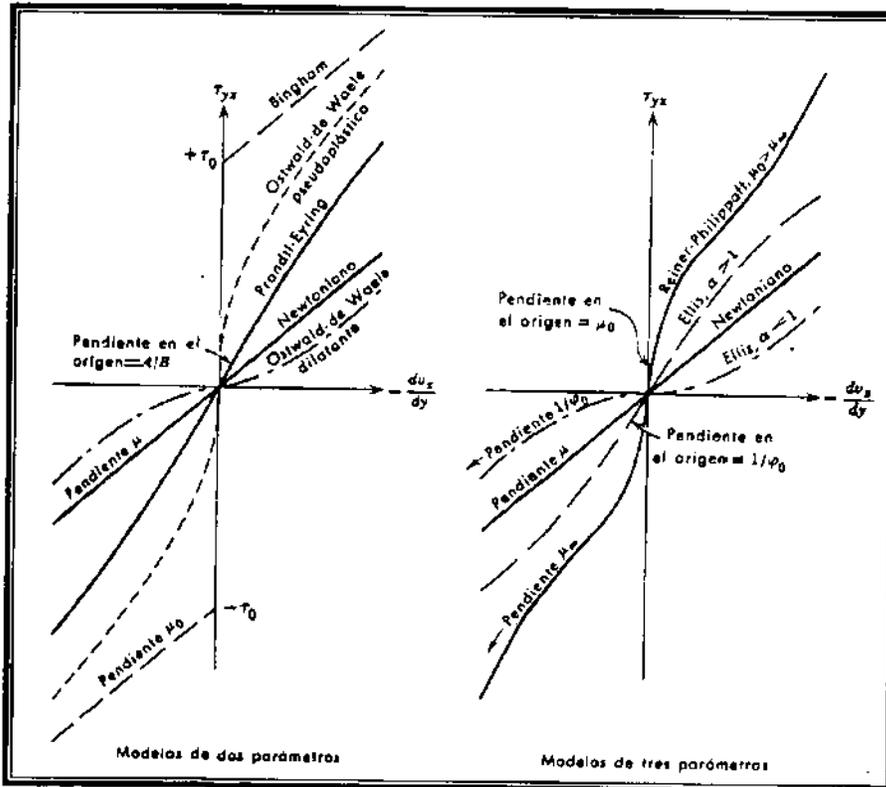


Figura 3.5 Modelos no-Newtonianos en estado estacionario

Fluidos no Newtonianos independientes del tiempo

Son aquellos cuyo comportamiento depende solo de la magnitud del esfuerzo cortante aplicado, más no de la duración de dicho esfuerzo. Los fluidos no Newtonianos independientes del tiempo pueden ser:

1. Fluidos plásticos de Bingham
2. Fluidos pseudoplásticos

Fluidos plástico de Bingham

Son aquellos fluidos que exhiben un punto de cedencia definido (τ_0) de forma tal que cualquier esfuerzo aplicado por debajo de este valor no produce ningún flujo; mientras que esfuerzos por arriba de este valor hacen que el fluido se comporte como un fluido Newtoniano. Este tipo de fluidos fue descubierto por Bingham en 1919. Ejemplos de este tipo de fluidos son: tinta de imprenta, ciertas suspensiones de arcilla en agua (entre 20 y 60 % de caolinita en agua), grasas de hidrocarburos espesadas, ciertos asfaltos y bitúmenes, algunas emulsiones y suspensiones pseudohomogéneas de partículas finas o ultrafinas en líquidos, con concentraciones intermedias, cabe aclarar que estas suspensiones pueden presentar comportamiento Newtoniano o pseudoplástico a bajas concentraciones, mientras que su comportamiento es dilatante a muy altas concentraciones. Como ejemplo de estas suspensiones se tienen: suspensiones acuosas de arcilla, de puzolana, de minerales finamente divididos, así como algunas pinturas.

La ecuación constitutiva de estos fluidos es:

$$\tau_{yx} - \tau_0 = -\mu \left(\frac{dv_x}{dy} \right) \dots \dots (3.2)$$

El punto de cedencia puede variar desde valores tan pequeños como 0.10 dinas/cm² hasta alrededor de 10¹⁰ dinas/cm².

Fluidos Pseudoplásticos

Son los fluidos más comunes de los no Newtonianos. Muestran un decremento en la viscosidad aparente al aumentar la velocidad de corte, por esta razón se dice que se "adelgazan" al aumentar la velocidad de corte. En la mayoría de los casos, este comportamiento está restringido a ciertos rangos de velocidad de corte. No existen ecuaciones constitutivas que sean generalmente aplicables para predecir el comportamiento de este tipo de fluidos sobre cualquier rango de velocidades de corte; sin embargo existen algunas ecuaciones más generales que se mencionan a continuación:

a) Modelo de ley de potencia o de Ostwald de Waele

Es una ecuación empírica de dos parámetros:

$$\tau_{yx} = -K \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^n \dots\dots (3.3)$$

Este modelo incluye dos parámetros reológicos:

K= índice de consistencia (cp-segⁿ⁻¹)

n= índice de comportamiento (adimensional, n<1= pseudoplástico, n=1 Newtoniano, n>1= dilatante)

Dos parámetros es el número mínimo para describir el comportamiento no-Newtoniano.

El modelo de ley de potencias ajusta datos experimentales para muchos fluidos pseudoplásticos en niveles intermedios de velocidad de corte, siendo adecuado para uno o dos ciclos en escala doble logarítmica. Sin embargo, en el caso particular de que $n=1$ y $K= \mu$, a medida que la velocidad de corte para un fluido pseudoplástico se acerca a cero, el esfuerzo cortante tiende a cero y el comportamiento se rige por la ley de Newton de la viscosidad.

En la misma forma, para velocidades de corte suficientemente altas, el ritmo de crecimiento del esfuerzo cortante al aumentar la velocidad de corte se mantiene constante, originando que el comportamiento sea nuevamente Newtoniano.

La viscosidad aparente para este tipo de fluidos se expresa como:

$$\mu_{ap} = K \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{n-1} \dots\dots (3.4)$$

b) Modelo de Eyring

Basándose en la Teoría Cinética de los líquidos de Eyring (1958), la siguiente ecuación de dos parámetros fue derivada:

$$\tau_{yx} = A \operatorname{senh}^{-1} \left(-\frac{1}{B} \frac{dv_x}{dy} \right) \dots\dots (3.5)$$

El modelo de Eyring predice el comportamiento pseudoplástico para valores finitos de τ_{yx} , y tiende asintóticamente a la ley de la viscosidad de Newton cuando τ_{yx} tiende a cero, siendo en este caso $\mu = A/B$. Esta ecuación es adecuada solo para rangos estrechos de velocidades de corte.

La viscosidad aparente para este modelo se expresa en la siguiente forma:

$$\mu_{ap} = \frac{-A \operatorname{senh}^{-1}\left(-\frac{l}{B} \frac{dv_x}{dy}\right)}{\frac{dv_x}{dy}} \dots\dots(3.6)$$

c) Modelo de Ellis

Con el objeto de lograr un rango de aplicabilidad mayor para fluidos reales, diversas ecuaciones que incluyen tres o más parámetros han sido propuestas.

El modelo de Ellis puede escribirse como:

$$-\frac{dv_x}{dy} = \left[\left(\frac{l}{\mu_0} \right) + C \tau_{yx}^{\alpha-1} \right] \tau_{yx} \dots\dots(3.7)$$

Los parámetros ajustables son: μ_0 , C , α .

La ecuación anterior incluye los siguientes casos:

- i) Si $\alpha > 1$ para valores pequeños de τ_{yx} , el modelo predice una viscosidad Newtoniana μ_0 , y comportamiento pseudoplástico para valores finitos de τ_{yx} .
- ii) Si $\alpha < 1$, la ley de Newton rige para valores grandes de τ_{yx} .
- iii) Si $C=0$; la ecuación de este modelo se transforma en la ley de Newton.
- iv) Si $(1/\mu_0) = 0$ (es decir, $\mu_0 \rightarrow \infty$) la ecuación de este modelo se transforma en la ley de potencias.

Utilizando este modelo, la viscosidad aparente puede expresarse como:

$$\mu_{ap} = \frac{\mu_0}{1 + C \tau_{yx}^{\alpha-1}} \dots (3.8)$$

d) Modelo de Reiner-Phillippoff

La ecuación constitutiva de este modelo puede escribirse como:

$$\tau_{yx} = \left[\mu_{\infty} + \frac{\mu_R - \mu_{\infty}}{1 + \left(\frac{\tau_{yx}}{D} \right)^2} \right] \left(- \frac{dv_x}{dy} \right) \dots (3.9)$$

Los parámetros ajustables son: μ_R , μ_{∞} y D .

Como se ha observado para los fluidos pseudoplásticos, se presenta comportamiento Newtoniano a velocidades de corte muy pequeñas y altas, la ecuación anterior se reduce a la ley de Newton para ambos casos, produciéndose valores de μ_0 para valores muy pequeños y μ_{∞} para valores muy grandes de la velocidad de corte. Es de hacer notar que al graficar la ecuación que rige el comportamiento de este modelo con coordenadas τ_{yx} contra dv_x/dy , se presentan puntos de inflexión a $\tau_{yx} = \pm D(3\mu_0/\mu_{\infty})^{1/2}$.

La viscosidad aparente utilizando este modelo se expresa como:

$$\mu_{ap} = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + \left(\frac{\tau_{yx}}{D} \right)^2} \dots (3.10)$$

e) Modelo de Sisko

En 1958 Sisko propuso un modelo basado en el concepto de que los esfuerzos originados por los conceptos Newtonianos y no Newtonianos son aditivos. Así: Definiendo $S_R = dv_x/dy$, el modelo de Sisko puede expresarse en la siguiente forma:

$$\tau_{yx} = aS_R + bS_R^c \dots\dots (3.11)$$

Donde a, b, y c son los parámetros a ajustar. La viscosidad aparente considerando este modelo es:

$$\mu_{ap} = -(bS_R^{c-1} + a) \dots\dots (3.12)$$

Sisko encontró que esta ecuación se aplica para un amplio rango de velocidad de corte y esfuerzos cortantes en una serie de grasas derivadas de hidrocarburos de composición y propiedades variables.

f) Modelo de Cross

En 1965 Cross desarrollo una ecuación de tres parámetros a partir de consideraciones mecánicas. Actualmente se considera que es una de las mejores para fluidos pseudoplásticos. En términos de la viscosidad aparente, este modelo se expresa como:

$$\mu_{ap} = \mu_{\infty} + \frac{\mu_{C0} - \mu_C}{1 + \alpha_C S_R^{2/3}} \dots\dots (3.13)$$

Esta ecuación ha sido probada con un gran número de soluciones de macromoléculas tales como soluciones acuosas de carboximetilcelulosa (CMC),

soluciones poliméricas no acuosas, copolímeros, acrílicos, etc., produciendo resultados muy favorables.

Los parámetros de ajuste son: μ_{c0} , μ_c y α_c .

g) Modelo de Meter

En 1964 Meter desarrolló una ecuación de cuatro constantes para el flujo laminar de fluidos pseudoplásticos a través de tuberías. Esta ecuación es:

$$\mu_{ap} = \mu_{\infty} + \frac{\mu_A - \mu_B}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_A}\right)^{\alpha-1}} \dots\dots (3.14)$$

Donde:

μ_A = Viscosidad aparente cuando S_R tiende a cero.

μ_B = Viscosidad aparente cuando S_R tiende a ∞ .

τ_A = Esfuerzo cortante para el que $\mu_{ap} = (\mu_0 + \mu_{\infty})/2$.

Cuando $\mu_0 \gg \mu_{\infty}$ (frecuentemente), entonces τ_m es el esfuerzo cortante para el que $\mu_{ap} \approx \mu_0/2$ y se le designa como $\tau_{1/2}$.

Los modelos presentados corresponden a unos cuantos de los que existen en la literatura. En general, para este tipo de fluidos no Newtonianos τ_{yx} es una función no lineal pero única de la velocidad de corte.

Fluidos dilatantes

Son aquellos que muestran un incremento en la viscosidad con aumento en la velocidad de corte. Por esta razón se dice que "engrosan" con el aumento en la velocidad de corte. Matemáticamente estos fluidos obedecen al mismo tipo de

modelos que los pseudoplásticos. Ejemplo: Emulsiones de aceite en agua o agua en aceite bajo ciertos rangos de velocidad de corte.

Fluidos no-Newtonianos dependientes del tiempo

El comportamiento de estos fluidos es función de la historia y del tiempo de deformación, es decir, la viscosidad puede aumentar o disminuir con el tiempo aún cuando la velocidad de corte se mantenga constante. Estos fluidos son conocidos también como fluidos de Boltzmann, existen dos tipos generales: fluidos tixotrópicos (caso de estudio esta tesis) y fluidos reopéticos. Para estos fluidos τ_{yx} es una función multivaluada de la velocidad de corte.

Fluidos tixotrópicos

Como ha sido mencionado en el apartado de cementos tixotrópicos, la viscosidad de estos fluidos disminuye con la duración del esfuerzo cortante aplicado. Este comportamiento se ha atribuido al hecho de que la viscosidad se debe parcialmente a estructuras intermoleculares, las cuales requieren de algún tiempo para ser construidas o destruidas.

Cuando el esfuerzo actuante sobre el fluido tixotrópico se suprime, la estructura interna de la substancia se reforma gradualmente produciéndose un incremento en la viscosidad del fluido. Esta reversibilidad origina un fenómeno de histéresis que se usa para medir la tixotropía del material en cuestión. Ejemplo de materiales tixotrópicos típicos: grasas, pinturas, tintas y productos alimenticios tales como mayonesa y catsup.

Fluidos reopécticos

Son aquellos fluidos que presentan un incremento en su viscosidad aparente con el tiempo de deformación, aun cuando la velocidad de corte se mantenga constante. Este tipo de comportamiento es muy desusual en los fluidos reales y cuando llega a presentarse, ocurre sobre un rango estrecho de velocidades de corte. Ejemplo de fluidos reopécticos: suspensiones de yeso en agua, soluciones de bentonita y soluciones de pentóxido de vanadio.

Fluidos no-Newtonianos viscoelásticos

Estos fluidos presentan simultáneamente respuestas de un sólido elástico y de un fluido viscoso a un esfuerzo aplicado. Contrariamente a un fluido puramente viscoso en que toda la energía de deformación se disipa, parte de esa energía es almacenada y puede recuperarse, como pasaría en un sólido elástico. Cuando un fluido exhibe este tipo de comportamiento, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte se complica mucho. Es de particular importancia en la entrada y salida de conexiones, en el flujo entre espacio anular entre dos cilindros, etc. Ejemplo de estos fluidos son: Algunas soluciones poliméricas, especialmente las concentradas.

3.3 Comportamiento reológico dependiente del tiempo²

Las propiedades reológicas de las lechadas de cemento, no solo dependen de la velocidad de corte, sino que también dependen del tiempo. Esto sucede por dos razones. Primero porque hay interacciones físicas entre las partículas de cemento en suspensión que resultan en una pérdida de la estructura que determina la naturaleza de la reología. Esta estructura es muy sensitiva en la ruta de deformación de los fluidos. Para cada uno de los materiales les corresponde una estructura de equilibrio y un esfuerzo de corte asociado con cualquier velocidad particular de corte. De cualquier modo el equilibrio solo puede ser alcanzado para

una cantidad de tiempo determinada. Para alcanzar el equilibrio, progresivamente se construirá o se romperá la estructura, dependiendo del gasto corriente.

Esto está asociado con un incremento o disminución del esfuerzo de corte hasta alcanzar un valor asintótico (figura 3.6). Este fenómeno dependiente del tiempo es llamado tixotropía. En los fluidos tixotrópicos, los procesos se suponen reversibles.

De cualquier modo rara vez este es el caso de las lechadas de cemento por lo que hay una segunda fuente de dependencia del tiempo que son las continuas reacciones químicas que modifican las propiedades de las lechadas de cemento con el tiempo de una manera irreversible. Sin embargo, la situación se llega a simplificar durante el periodo de inducción, particularmente para lechadas de cemento retardado, donde cualquier dependencia del tiempo está dominada por los efectos tixotrópicos mientras prevalezca el efecto del retardador.

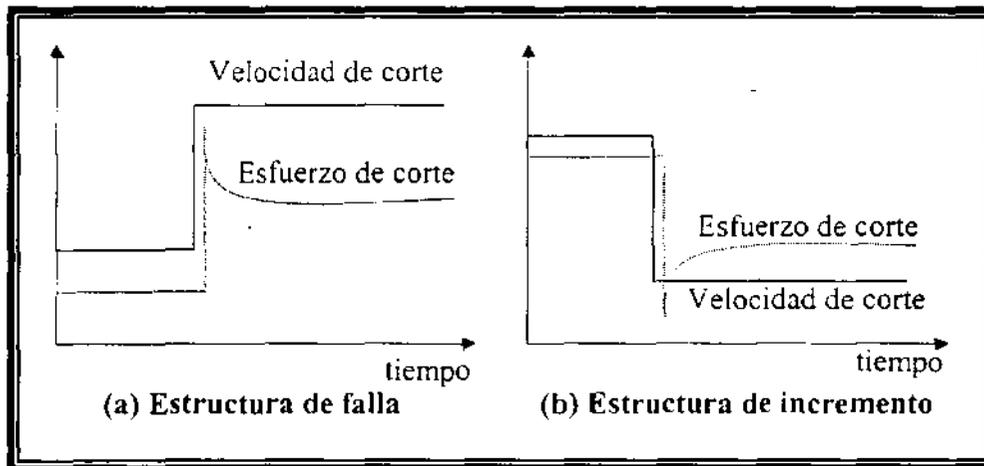


Figura 3.6 Respuesta dependiente del tiempo de un fluido tixotrópico a un cambio de paso en la velocidad de corte

Rango de las velocidades de corte encontradas en un pozo

Una explicación acerca del comportamiento reológico de una lechada de cemento es extremadamente compleja, y los modelos reológicos convencionales que se utilizan para caracterizarlas solo describen el comportamiento de las condiciones de flujo bajo rangos limitados, sin considerar la dependencia del tiempo.

Por lo tanto, después de intentar caracterizar y modelar las propiedades reológicas de una lechada de cemento, es absolutamente esencial tener una idea de la velocidad de deformación a que esta sometida mientras se coloca en el agujero.

El modelo Ley de potencias y Plástico de Bingham son los modelos más usados para describir las propiedades reológicas de las lechadas de cemento. Ambos modelos pueden describir la relación entre el esfuerzo de corte y las velocidades de corte. De cualquier modo cuando se intenta describir el comportamiento de las lechadas de cemento en un rango más amplio de la velocidad de corte, la situación es diferente.

El modelo de ley de potencias tiene limitaciones debido a:

La mayoría de las lechadas de cemento exhiben un esfuerzo de cedencia, mientras que el de ley de potencias no lo considera.

La viscosidad de cualquier fluido a altas velocidades de corte puede tender a valores diferentes de cero, que no toma en cuenta el modelo ley de potencias.

Por tanto, el modelo ley de potencias subestima los esfuerzos de corte tanto a bajas como a altas velocidades de corte.

El modelo plástico de Bingham incluye el esfuerzo de cedencia y la viscosidad límite, próxima a la velocidad de corte infinita. Sin embargo, no todas las lechadas de cemento son bien descritas por este modelo. Cuando graficamos los esfuerzos de corte contra las velocidades de corte (figura 3.7), obtenidas en un viscosímetro de cilindros coaxiales²⁰, algunas lecturas reológicas muestran una tendencia cercana al eje de la velocidad de corte. Cuando este es el caso, el modelo plástico de Bingham se comporta de una manera opuesta a la del modelo ley de potencias. Es decir, ocurre una sobreestimación de los esfuerzos de corte que puede ser también un problema, específicamente para predecir la fricción por presión dentro

de las tuberías y en el espacio anular. Varios modelos han sido usados para resolver este problema, por ejemplo el de Casson, Vocadlo o Hershel-Bulkley. Se ha encontrado que la mayoría ha tenido una buena aproximación al comportamiento reológico con las lechadas de cemento. Pero son incapaces de considerar la dependencia del tiempo.

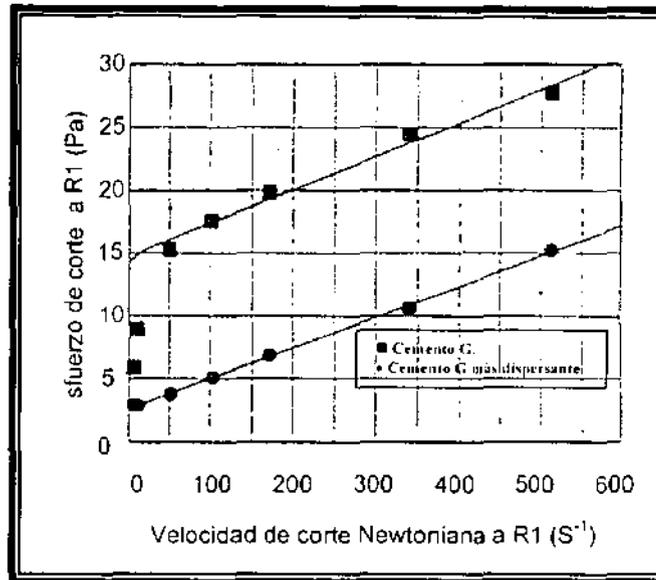


Figura 3.7 Curvas de flujo de dos lechadas de cemento en un viscosímetro cilíndrico coaxial estandar-escala lineal.

Una comparación entre las figuras 3.7 y 3.8 muestra que para este ejemplo específico el modelo de Herschel Bulkley describe mejor el comportamiento reológico que el modelo plástico de Bingham cuando los datos no son afectados por el deslizamiento de la pared (es decir arriba de 40 s^{-1}). De cualquier modo el uso de estos modelos está limitado por varias razones:

No están claros hasta ahora los datos obtenidos por el viscosímetro cilíndrico coaxial ya que es afectado por los efectos finales, deslizamiento en las paredes y migración de las partículas de macromoléculas semirígidas como las del cemento (Cortes I. 1996).

La mayoría de las lechadas de cemento están caracterizadas con viscosímetros rotacionales a nivel de campo, con seis velocidades, donde como se menciona, frecuentemente solo toman tres lecturas que son usualmente lo más apropiadas y usados como datos del modelo (lectura a 600 RPM, lectura a 300 RPM y gel inicial).

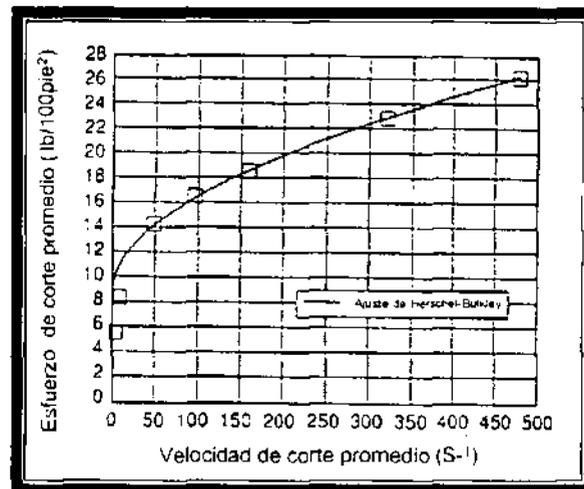


Figura 3.8 Ajuste de Herschel-Bulkley a los datos de la formulación del cemento presentada en la fig. 3.7

Dependencia de la temperatura y la presión en las lechadas de cemento

La dependencia de la presión y de la temperatura en las propiedades reológicas de la lechada de cemento no han sido bien explicadas mediante el uso de equipos estandar (viscosímetro coaxial), ya que permiten solo mediciones a presión atmosférica y temperaturas de 80 a 90°C, ya que ha temperaturas elevadas es más problemática la obtención de la reología.

Muy pocos trabajos se han ocupado de estudiar la reología de las lechadas de cemento dependientes de la presión. Por otro lado la falta de equipo es la razón principal para hacer dichos estudios. Como las lechadas de cemento son base agua, y desde el punto de vista de la baja compresibilidad y dependencia

viscosidad-presión del agua, los efectos de la presión sobre las propiedades de flujo son usualmente despreciados.

Lo anterior es probable que suceda en la mayoría de los sistemas excepto en aquellos que exhiben alta relación sólido-líquido. En las formulaciones, la compresibilidad más alta es la de la fase líquida, cuando se compara con la fase sólida, un incremento de presión junto con un incremento en la relación sólido a líquido originará un significativo aumento de la viscosidad, razón por la cual es importante tener un mayor conocimiento de la influencia de la presión en este tipo de fluidos.

La viscosidad de los sólidos en suspensión se incrementa en forma exponencial con la fracción de volumen de sólido, con una tendencia de aproximación al infinito cerrándose hasta aproximarse al empaquetamiento. Por lo tanto este se incrementará sensiblemente para represionarse conforme se incrementa el contenido de un sólido.

Por otro lado la temperatura tiene un efecto drástico sobre la reología de las lechadas de cemento, dada la naturaleza exotérmica de la reacción de hidratación que activa y cataliza la reticulación del cemento. Su importancia radica en la velocidad de reacción, es decir, la velocidad con que adquiere y cambia de propiedades reológicas el cemento.

Un punto muy importante el cual necesita ser reforzado a esta etapa, y que es frecuentemente olvidada, es que, la mayoría de las lechadas de cemento exhiben un cambio estructural no solo en su base fija sino bajo condiciones de velocidad de corte y temperatura constantes, debido a las ecuaciones químicas de hidratación.

Por ejemplo, la evolución de la velocidad de corte como una función del tiempo para una formulación dada de cemento en un viscosímetro a una velocidad de 511 s^{-1} se muestra en la figura 3.9.

El comportamiento dependiente del tiempo no solo es debido a la historia de los esfuerzos de corte sino que también se debe a las reacciones químicas de la lechada de cemento. Una vez más este efecto ha sido poco investigado. De cualquier modo en ausencia de más información uno debe concluir que las propiedades que han sido presentadas son únicamente representativas del material a una velocidad y tiempo dado de mezclado. Siendo objetivo de este trabajo encontrar la relación en el tiempo que incorporan los efectos tixotrópicos y las reacciones químicas del cemento.

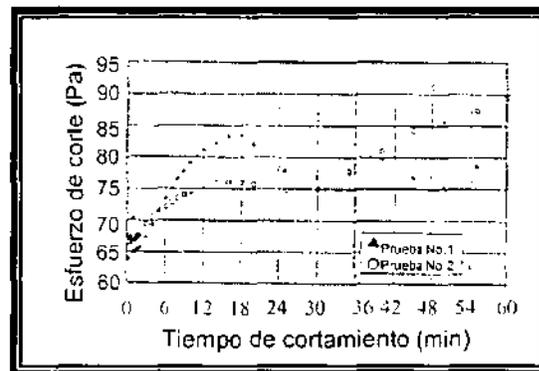


Figura 3.9 Esfuerzo de corte contra tiempo de cortamiento (resultados obtenidos usando un viscosímetro a una velocidad de corte de 511 s^{-1})

En resumen, el cambio estructural de las lechadas de cemento bajo condiciones de velocidad de corte y temperatura constantes para una formulación dada no solo depende del tiempo, sino que es función de la historia de esfuerzos de corte y de las reacciones químicas que están ocurriendo dentro de la misma. Es decir, existen fuerzas de atracción entre las moléculas debido al proceso de hidratación que tiende a formar un gel

que forma uniones entre los cristales de los componentes del cemento durante el proceso de espesamiento hasta alcanzar el fraguado total.

CAPITULO 4 DESARROLLO DE LOS MODELOS REOLÓGICOS

4.1 Diseño de los modelos reológicos

En los fluidos no Newtonianos dependientes del tiempo como lo es la lechada de cemento, el problema de la caracterización reológica es más complicada ya que en primer lugar existen muchas propiedades que pueden ser medidas en experimentos a régimen permanente o transitorio. Además la caracterización de estos materiales implica determinar sus parámetros, que son dependientes de la rapidez de deformación, frecuencia y tiempo, etc. Estos parámetros determinan a su vez las constantes o funciones de modelos reológicos específicos.

Las etapas para obtener el modelo reológico son las siguientes:

Etapas experimental

- Diseño factorial que considera las combinaciones de concentración de aditivos.
- Determinación del tiempo bombeable en un consistómetro presurizado marca Chandler modelo 8-25 para conocer los intervalos de tiempo en que tiene efecto el gel tixotrópico y el gel por reacción. Además para determinar la duración de las pruebas en el viscosímetro y así evitar el fraguado en la celda de este último.
- Determinación de la reología en el viscosímetro Fann modelo 70 de alta presión y temperatura a las condiciones promedio del campo Cantarell (ver figura 4.1), para obtener la serie de datos experimentales de esfuerzo de corte a diferentes velocidades de corte en el tiempo.

Etapas de modelamiento

- Análisis factorial para determinar el peso que tiene cada variable y describir el comportamiento del proceso experimental.

- Análisis de regresión y varianza para evaluar la relación del esfuerzo respecto a la velocidad de deformación considerando los parámetros (funciones de ajuste) dependientes del tiempo.

El diseño del modelo reológico para las lechadas de cemento tixotrópico tomó en consideración como variables predictoras: La velocidad de corte, la concentración de aditivos y el tiempo de duración de la prueba. Y como variable de respuesta se consideró el esfuerzo de corte. Cabe hacer mención que se utilizaron los equipos antes mencionados ya que además de proporcionarnos la relación entre variables fue posible simular las condiciones de presión y temperatura de pozo.

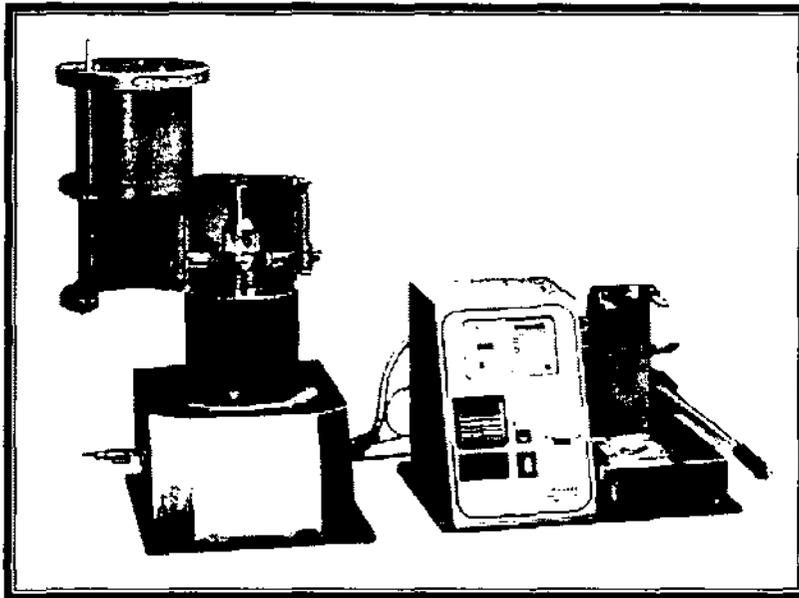


Figura 4.1 Viscosímetro computarizado Fann 70
(alta presión y alta temperatura)

Para tal efecto se manejaron tres niveles de la concentración de los aditivos (tixotrópico = 0.2, 0.7, 1.25 % peso de cemento, y retardador = 0.1, 0.8, 1.5 % peso de cemento) de acuerdo a los porcentajes que se manejan en campo, los cuales se muestran en la tabla 4.1. El rango de velocidades fue de 30 a 300 revoluciones por minuto (RPM) para el modelo operativo y 2 a 600 RPM para el modelo generalizado. Para el análisis factorial, regresión y varianza se tomo en

consideración hasta 50 minutos de duración para todas las pruebas, debido a que hasta este tiempo las mediciones mostraron estabilidad.

4.2 Descripción de pruebas

Las pruebas para la obtención del tiempo bombeable y reología de la lechada de cemento se realizaron en los laboratorios de Producción del Instituto Mexicano del Petróleo de la Cd. de México y de la Cd. de Poza Rica, Ver., respectivamente. Para la prueba de tiempo bombeable se utilizó un consistómetro presurizado marca Chandler y para la prueba de reología se utilizó un viscosímetro computarizado marca Fann. En esta tesis se desarrolla un trabajo enfocado a entender las bases y naturaleza de la reología en función del tiempo para un cemento tixotrópico, razón por la cual los únicos aditivos considerados en la mezcla de prueba son:

- Aditivo tixotrópico que da origen a la tixotropía del fluido, motivo de estudio de esta tesis.
- Retardador por su implicación inherente con el tiempo de reacción que es el motivo de estudio de este trabajo. Además de ampliar el intervalo de tiempo para el estudio de la tixotropía.

Se emplearon distintas concentraciones de los aditivos anteriormente mencionados. Se aplicaron a las pruebas una presión de 5200 lb/pg² y una temperatura de circulación de 71°C, tales condiciones corresponden a los promedios encontrados en el asentamiento de las tuberías cortas de revestimiento (liners) de 9 5/8" a una profundidad promedio de 2440 mts en el Activo de Cantarell.

4.2.1 Pruebas experimentales para la obtención del tiempo bombeable

Para la obtención del tiempo bombeable se diseñó la siguiente matriz de experimentos²², tabla 4.1.

CEMENTO	COMPONENTES (grs)		
	AGUA	TIJOTRÓPICO	RETARDADOR
860	327	0	0
860	327	2	0
860	327	3	0
860	327	4	0
860	327	0	1
860	327	0	1.5
860	327	0	2
860	327	2	1
860	327	3	1.5
860	327	4	2

Tabla 4.1 Matriz de experimentos para la obtención del tiempo bombeable de las lechadas de cemento

El tiempo bombeable se obtuvo en el consistómetro (previa calibración), aplicando el procedimiento de la Norma API (American Petroleum Institute) RP 10B, denominada " Specification for cements and materials for well cementing", y la cédula no. 26 para "Pruebas de simulación de cementación de tuberías cortas de revestimiento (liners)", de la Norma API RP 10, denominada " Materials and testing for well cements", la cual tiene los siguientes parámetros de diseño: profundidad de 2440 m, temperatura de circulación de pozo de 71°C, temperatura estática del fondo del pozo de 111°C, presión de 5200 psi y tiempo en alcanzar las condiciones de prueba 15 minutos (condiciones de pozo para el asentamiento de liners de 9 5/8" del Activo Cantarell).

La preparación de la lechada se hizo siguiendo el procedimiento de la norma API Spec. 10A, utilizando para tal fin 860 g de cemento tipo H, 327 g de agua destilada y las concentraciones de aditivos que se muestran en la tabla 4.1. La relación cemento-agua es la recomendada para este tipo de cementaciones.

Las pruebas se hicieron en el consistómetro presurizado, a la presión y temperatura mencionadas con anterioridad hasta alcanzar una consistencia de 100 unidades, tomando el tiempo que tardaron en alcanzar dicha consistencia,

reportando estos como tiempos de espesamiento o bombeable. En la tabla 4.2 se pueden observar los tiempos bombeables obtenidos para cada muestra.

CEMENTO		ADITIVO					
		RETARDADOR		TIXOTROPICO		TIX-RET	
(grs)	T _B (MIN)	(grs)	T _B (MIN)	(grs)	T _S (MIN)	(grs)	T _B (MIN)
860	61	1	89	2	63	2 - 1	69
860	61	1.5	93	3	63	3 - 1.5	65
860	61	2	117	4	63	4 - 2	63

Tabla 4.2 Tiempos bombeables obtenidos empleando el consistómetro presurizado.

4.2.2 Pruebas experimentales para la obtención de la reología a presión y temperatura de pozo

Empleando los tiempos bombeables obtenidos en el punto anterior se obtuvo la reología a diferentes tiempos de las lechadas de cemento mediante el viscosímetro computarizado (previa calibración), ajustando la proporción de materiales al volumen de la celda del viscosímetro, como se puede observar en la tabla 4.3.

COMPONENTES (grs)			
CEMENTO	AGUA	TIXOTRÓPICO	RETARDADOR
376.25	143.06	0	0
376.25	143.06	0.875	0
376.25	143.06	1.3125	0
376.25	143.06	1.75	0
376.25	143.06	0	0.4375
376.25	143.06	0	0.6562
376.25	143.06	0	0.875
376.25	143.06	0.875	0.4375
376.25	143.06	1.3125	0.6562
376.25	143.06	1.75	0.875

Tabla 4.3 Matriz de experimentos utilizada para la obtención de la reología de una lechada de cemento a 71°C y 5200 psi.

Los resultados de las pruebas del viscosímetro Fann 70 se muestran en la tabla 4.4. Dichos resultados fueron afectados por los factores de 1.703 y 1.067 para la velocidad de corte y esfuerzo de corte respectivamente, con la finalidad de convertirlas a unidades de campo (la velocidad de corte esta expresada en S^{-1} y el esfuerzo de corte en $lb/100pie^2$) y solo se muestran las lecturas hasta un tiempo de 50 minutos, tiempo que se utilizó para la obtención del modelo.

Gráficos de las pruebas y su análisis

Utilizando los valores de la tabla 4.4 se hicieron las gráficas de esfuerzo de corte contra velocidad de corte para cada prueba, estas se muestran en las figuras 4.2 a la 4.6.

PRUEBA 1

TIEMPO (seg)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
100.0	111.0	113.1	111.0	113.1	111.0	111.0	178.0	106.6	227.9	371.7	
100.5	99.8	94.7	92.3	92.3	47.4	200.0	299.0	316.8	370.7		
104.8	95.9	94.7	90.2	90.2	30.1	171.4	295.7	321.2	449.0		
428.8	178.0	175.8	31.5	127.0	127.0	236.8	378.6	374.3	526.5		
636.9	605.3	622.3	576.2	548.3	471.8	657.0	626.6	620.5	631.7		

PRUEBA 2

TIEMPO (seg)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
7.4	8.1	8.8	16.3	13.8	17.8	178.0	346.8	519.8	1828.9		
79.9	13.0	13.6	37.3	24.3	24.3	54.9	71.5	108.6	163.1		
44.8	35.4	28.8	30.9	35.4	37.8	149.6	196.5	142.0	221.8		
71.5	53.2	49.1	56.7	44.4	48.7	151.7	182.5	213.0	227.3		
100.3	162.4	149.8	173.1	129.8	153.8	217.6	200.0	229.6	309.2		
490.6	481.4	151.6	149.4	187.6	211.3	243.3	362.8	367.5	419.3		

PRUEBA 3

TIEMPO (seg)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
138.7	70.4	87.5	87.2	80.3	113.1	150.3	199.7	199.4	202.3		
127.8	125.3	125.1	114.0	109.3	109.3	202.4	519.2	562.5	238.4		
181.4	172.9	145.4	142.2	130.2	119.5	224.1	483.1	609.9	610.3		
100.1	102.4	100.1	97.7	83.9	91.6	147.2	362.6	202.4	207.0		
256.1	193.8	176.7	108.7	97.7	108.3	123.1	153.6	248.0	505.8		

PRUEBA 4

TIEMPO (seg)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
117.4	51.4	53.8	55.0	50.4	71.7	145.3	191.2	219.6	421.0		
303.0	105.6	92.5	92.2	88.8	89.6	225.4	330.8	483.1	304.1		
367.0	173.7	156.2	149.6	149.2	145.3	252.2	411.0	522.8	567.9		
115.2	612.5	376.2	599.7	567.0	589.0	412.1	515.9	485.5	590.7		
339.6	0.0	0.0	139.9	137.6	292.4	575.1	561.2	570.6	586.9		

PRUEBA 5

TIEMPO (seg)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
36.4	36.9	38.4	42.0	44.4	44.6	101.3	136.1	100.3	211.6		
33.1	28.8	24.1	26.5	35.4	33.1	103.8	132.3	123.6	211.4		
39.1	28.6	30.9	30.9	30.9	30.9	119.9	151.5	134.4	202.5		
86.6	42.0	37.6	37.6	37.6	37.6	138.6	142.1	153.6	425.1		
348.7	96.2	96.2	74.7	93.9	121.8	189.8	219.8	256.7	377.7		

PRUEBA 6

TIEMPO (seg)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
55.7	38.3	49.1	16.5	51.2	48.1	87.5	30.9	100.2	300.8		
23.2	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	22.3	106.1	127.0	270.2		
28.6	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	113.1	150.1	202.1	309.8		
38.3	35.1	33.1	30.9	30.9	33.1	117.6	200.0	191.2	314.1		
119.2	53.4	60.2	64.7	64.7	64.7	218.5	367.0	233.4	381.8		

PRUEBA 7

TIEMPO (seg)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
149.8	64.7	82.3	82.3	84.0	64.7	139.8	127.0	118.1	243.5		
23.1	39.8	37.8	39.8	39.8	39.8	90.0	149.8	128.1	237.5		
39.4	33.1	35.4	35.4	35.4	35.4	82.6	151.9	178.8	226.6		
38.8	37.6	37.6	37.6	35.4	37.6	88.2	133.8	190.2	254.7		
44.4	44.4	44.4	44.4	44.4	44.4	96.2	133.8	133.8	253.8		

PRUEBA 8

TIEMPO (seg)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
48.3	47.2	47.2	47.2	53.8	60.6	149.8	189.1	229.0	341.4		
66.3	74.0	87.2	87.2	0.0	0.0	154.3	247.5	351.7	328.8		
143.0	114.0	102.4	33.0	48.0	93.0	195.5	327.8	429.2	389.2		
490.4	228.1	335.8	210.6	280.0	197.6	272.3	357.7	530.8	733.6		
239.8	241.1	241.1	239.0	239.0	232.6	574.2	988.7	525.6	654.8		

PRUEBA 9

TIEMPO (seg)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
226.9	67.4	106.1	111.9	113.1	113.1	227.9	213.0	237.6	301.1		
51.2	38.4	37.8	38.4	38.4	38.4	143.0	196.6	230.4	526.3		
216.4	49.8	46.6	46.6	48.8	81.2	187.8	298.5	296.3	377.9		
261.8	106.1	113.1	128.6	128.6	128.6	246.4	292.4	305.6	486.7		
156.9	202.7	207.9	158.8	151.6	188.8	633.6	608.0	668.9	812.5		

PRUEBA 10

TIEMPO (seg)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
367.0	171.9	164.6	182.4	186.7	115.2	209.1	224.1	230.5	307.3		
213.4	89.6	79.0	100.3	76.6	78.8	217.7	286.5	354.2	629.1		
347.8	256.1	213.4	228.2	290.0	213.0	375.8	528.2	518.4	818.9		
239.8	251.8	236.9	224.1	254.6	256.1	379.9	548.3	587.4	824.8		
629.6	629.5	0.0	0.0	0.0	629.5	473.7	618.8	629.5	631.7		

Tabla 4.4 Lecturas obtenidas en el viscosímetro Fann 70 (convertidas a unidades de campo)

ESFUERZO DE CORTE VS VELOCIDAD DE CORTE
 PRUEBA CEMENTO AGUA
 1 376.25 143.06

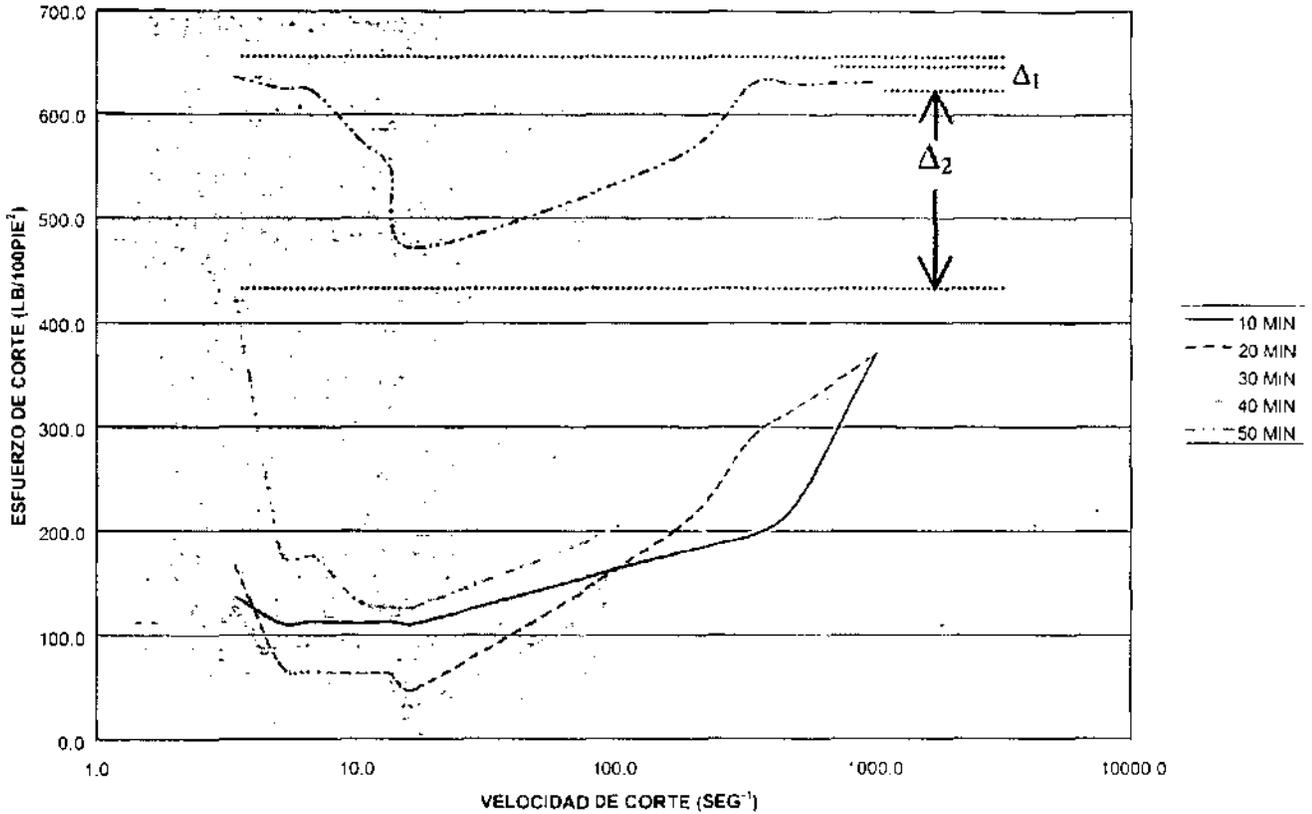


Figura 4.2 Esfuerzo de corte contra velocidad de corte de la prueba No. 1

En la figura 4.2 se observa que en el rango de 10 a 30 minutos de iniciada la hidratación de la lechada de cemento, el avance de la reticulación por reacción no es considerable. En este avance la red cristalina no es tan fuerte, las estructuras formadas aun pueden ser rotas con esfuerzos moderados. En el rango de 40 a 50 minutos se alcanza una conversión considerable en la reacción obteniéndose una red más consolidada. La fracción de la red no consolidada es mínima y es susceptible de degradarse debido al esfuerzo pero su efecto no es de considerarse. Cerca de la etapa final de reacción (fraguado) a bajas velocidades

ya se manifiesta una gran resistencia al flujo. Conforme se incrementa la velocidad de corte se rompen las estructuras más débiles disminuyendo el esfuerzo necesario para hacer fluida la lechada. La proporción consolidada de la red es mayoritaria de tal manera que el esfuerzo vuelve a incrementarse. El gradiente de consolidación (Δ) de la red disminuye conforme avanza el tiempo de reacción, como se puede observar en la curva para 50 minutos.

ESFUERZO DE CORTE VS VELOCIDAD DE CORTE
PRUEBA CEMENTO AGUA TIXOTRÓPICO
2 376.25 143.08 0.875

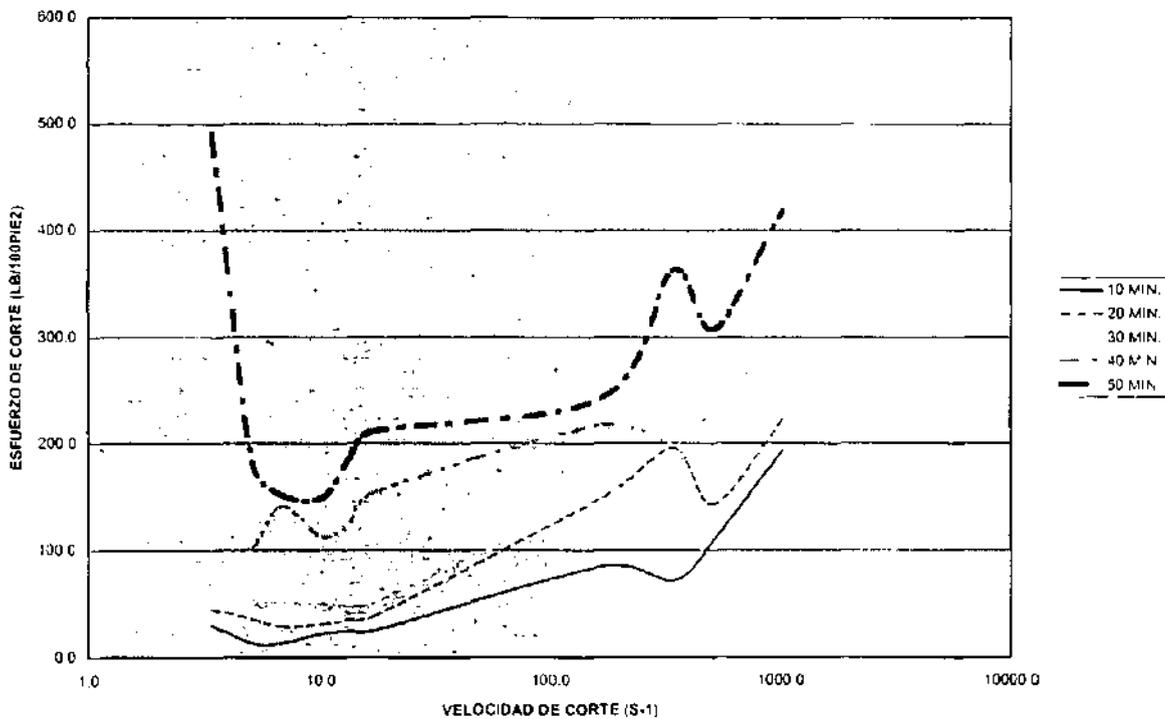


Figura 4.3 Esfuerzo de corte contra velocidad de corte de la prueba No. 2

En la figura 4.3 se puede observar como a tiempos altos existe un esfuerzo debido a los geles de la reacción (consolidados y no consolidados) y a los geles tixotrópicos, observándose puntos de inflexión debido a la formación y destrucción de estos últimos. A tiempos iniciales el cambio es menos pronunciado y solo actúan los efectos de los geles tixotrópicos.

ESFUERZO DE CORTE VS VELOCIDAD DE CORTE
 PRUEBA CEMENTO AGUA RETARDADOR
 5 376.25 143.06 0.4375

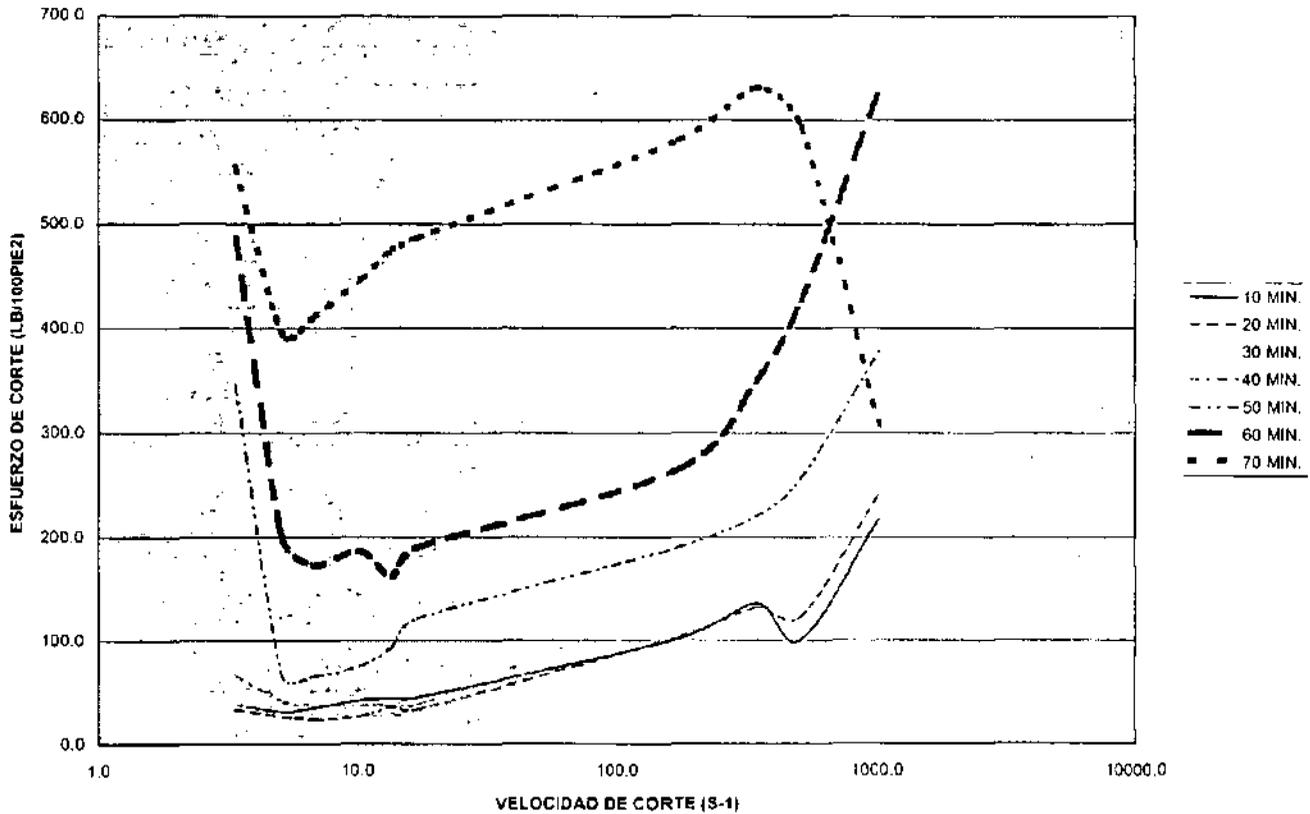


Figura 4.4 Esfuerzo de corte contra velocidad de corte de la prueba No. 5

En la figura 4.4 se observa que cerca del tiempo de reacción el retardador tiene poco efecto y se ve un esfuerzo inicial considerable para romper las estructuras no consolidadas, el cual decae conforme se va incrementa la velocidad de corte, volviéndose a incrementar por la fuerza de las estructuras consolidadas ya existentes. En tiempos iniciales el retardador tiene gran efecto por lo que no existe esfuerzo inicial considerable debido a la formación de geles de la reacción.

ESFUERZO DE CORTE VS VELOCIDAD DE CORTE
 PRUEBA CEMENTO AGUA TIX-RET
 8 376.25 143.06 .875-.4375

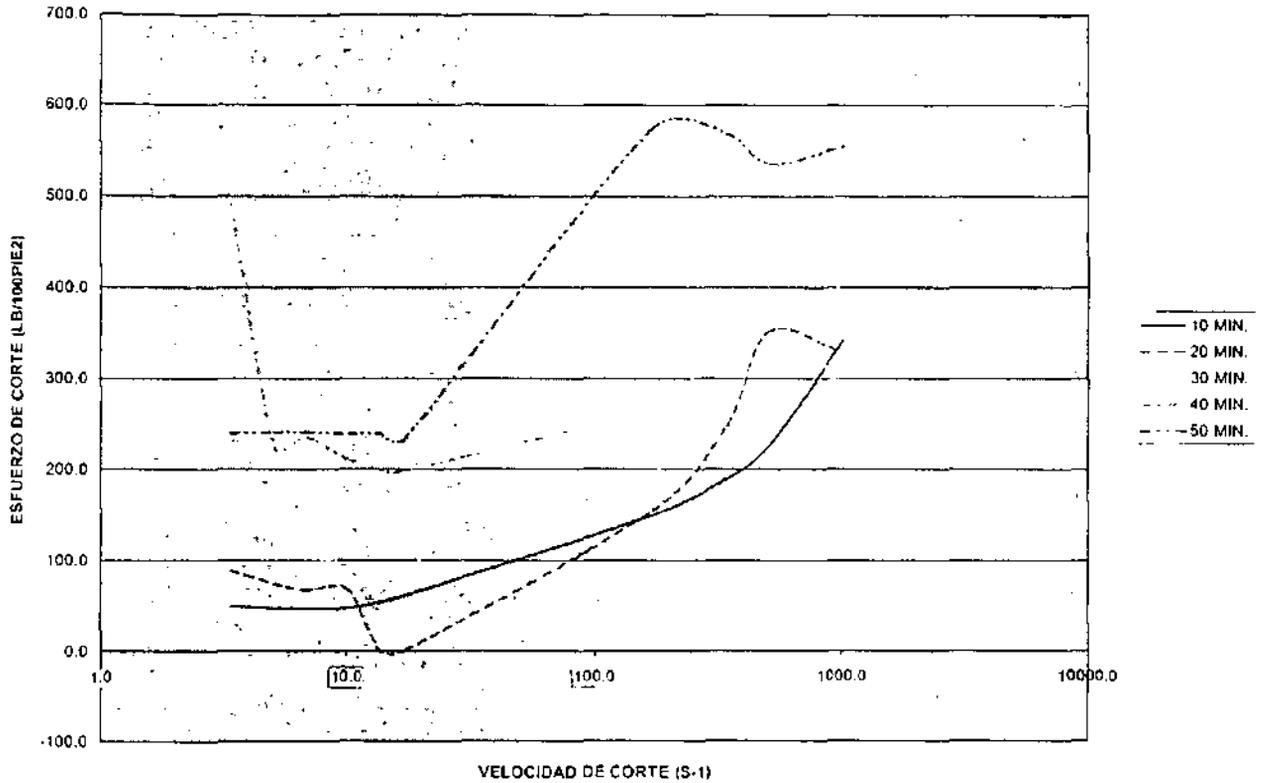


Figura 4.5 Esfuerzo de corte contra velocidad de corte de la prueba No. 8

En la figura 4.5 se observa como el retardador evita que se desarrollen altos esfuerzos de corte iniciales al existir menor efecto de los geles de reacción con los puntos de inflexión característicos de su formación y destrucción. En la figura 4.6 se agrupan las gráficas de esfuerzo de corte contra velocidad de corte de las pruebas restantes en donde se puede observar un comportamiento similar al descrito.

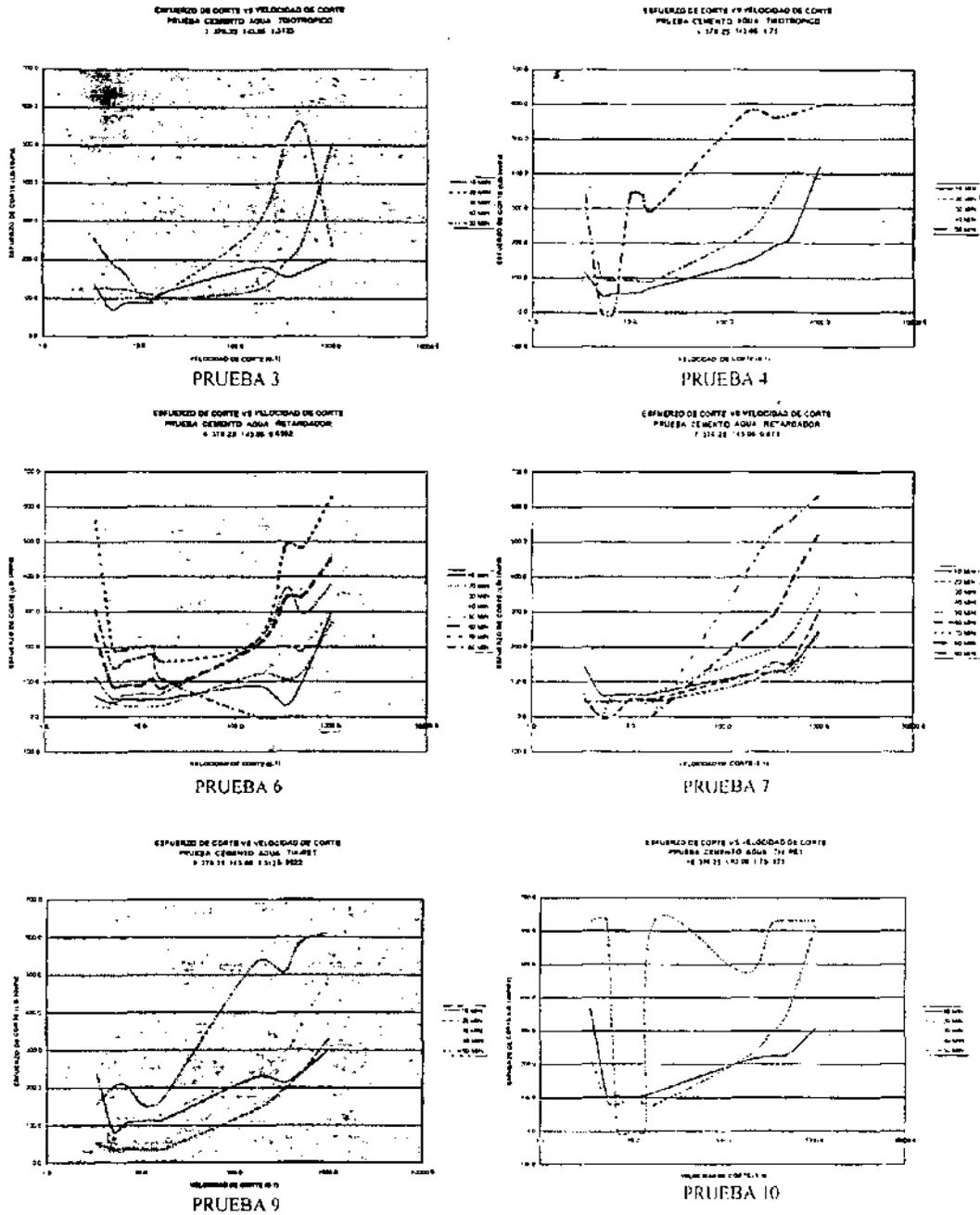


Figura 4.6 Esfuerzo de corte contra velocidad de corte de las pruebas Nos. 3, 4, 6, 7, 9 y 10.

Así mismo se elaboraron las gráficas que relacionan el esfuerzo de corte contra el tiempo de cada prueba, las cuales se muestran en la figura 4.7.

En la figura 4.7 se observa en general como el esfuerzo de corte de las lechadas de cemento, no solo dependen de la velocidad de corte, sino que también dependen del tiempo. Esto puede suceder por dos razones. Primero porque hay

interacciones físicas entre las partículas de cemento en suspensión que resultan en una pérdida de la estructura que determina la naturaleza de la reología. Esta estructura es muy sensitiva en la ruta de deformación de los fluidos. Para cada uno de los materiales les corresponde una estructura de equilibrio y un esfuerzo de corte asociado con cualquier velocidad particular de corte. De cualquier modo el equilibrio solo puede ser alcanzado para una cantidad de tiempo determinada.

Para alcanzar el equilibrio, progresivamente se construirá o se romperá la estructura, dependiendo del gasto corriente.

Esto esta asociado con un incremento o disminución del esfuerzo de corte hasta alcanzar un valor asintótico. Este fenómeno dependiente del tiempo es el comportamiento tixotrópico del cemento.

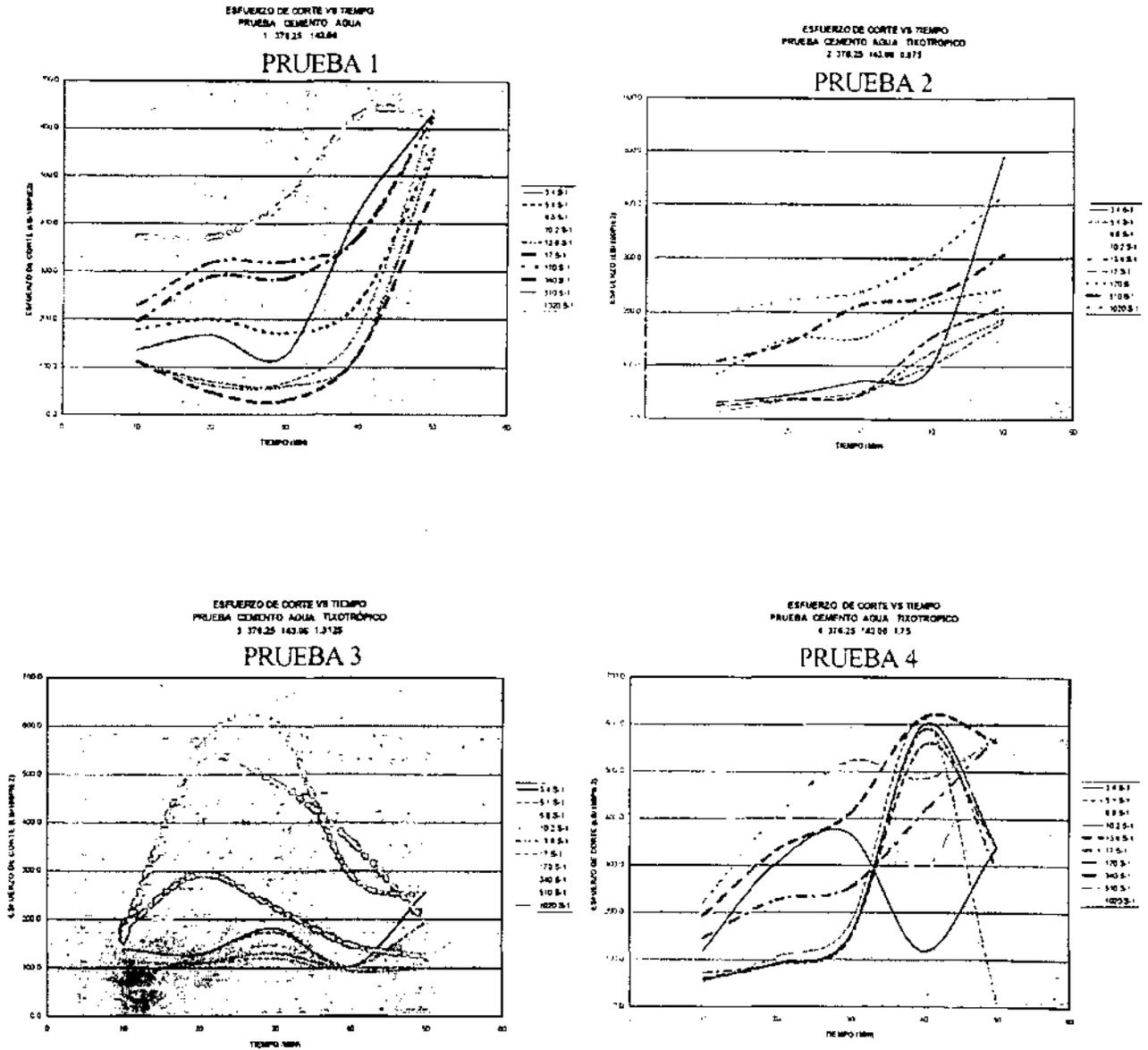


Figura 4.7 Esfuerzo de corte contra tiempo de las pruebas Nos. 1 a la 10. (continuación en pagina siguiente)

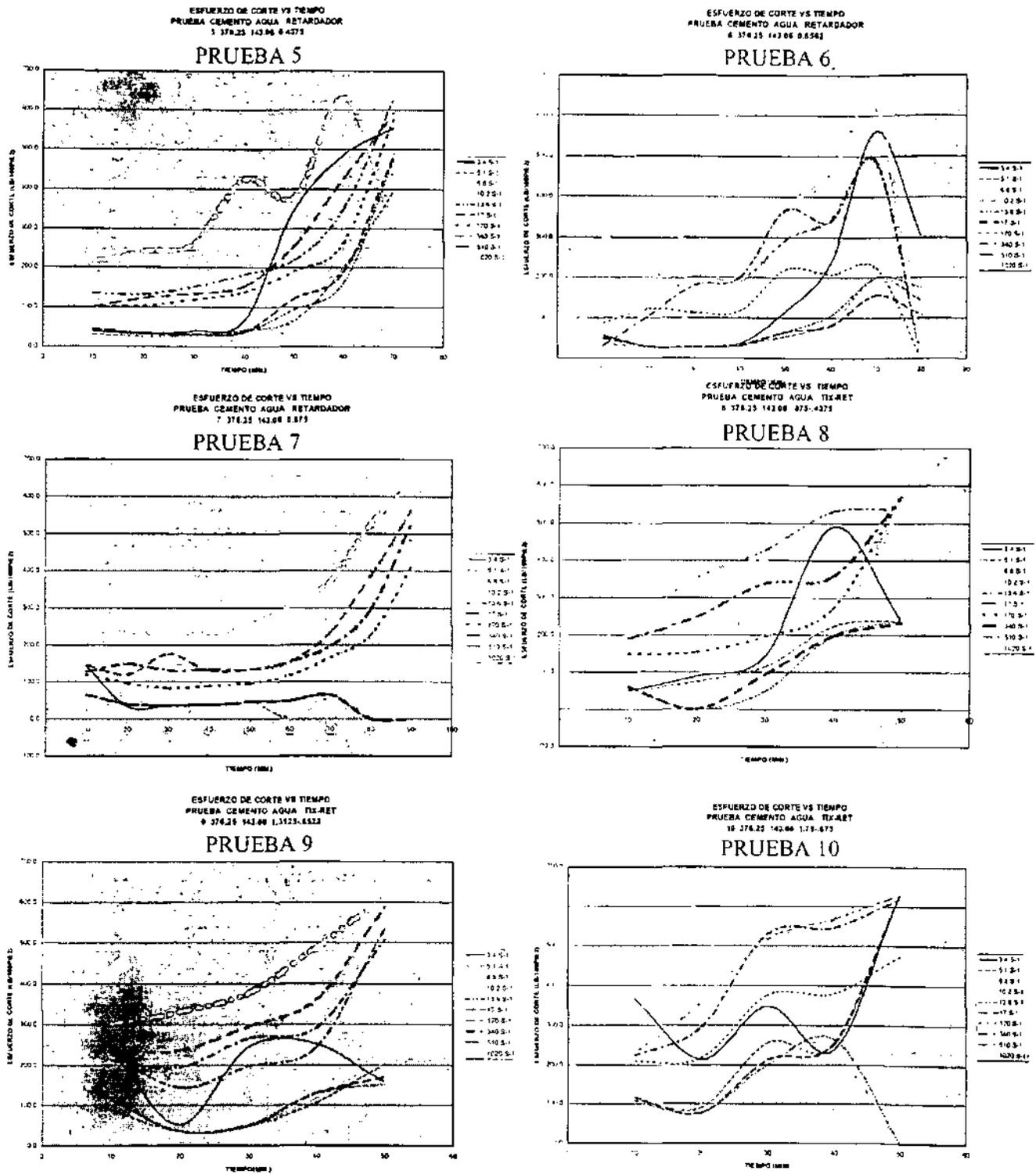


Figura 4.7 Esfuerzo de corte contra tiempo de las pruebas Nos. 1 a la 10 (continuación).

Similarmente, se gráficaron las viscosidades aparentes obtenidas a 300 RPM contra el tiempo para cada una de las muestras como se puede observar en las figuras 4.8 a la 4.12.

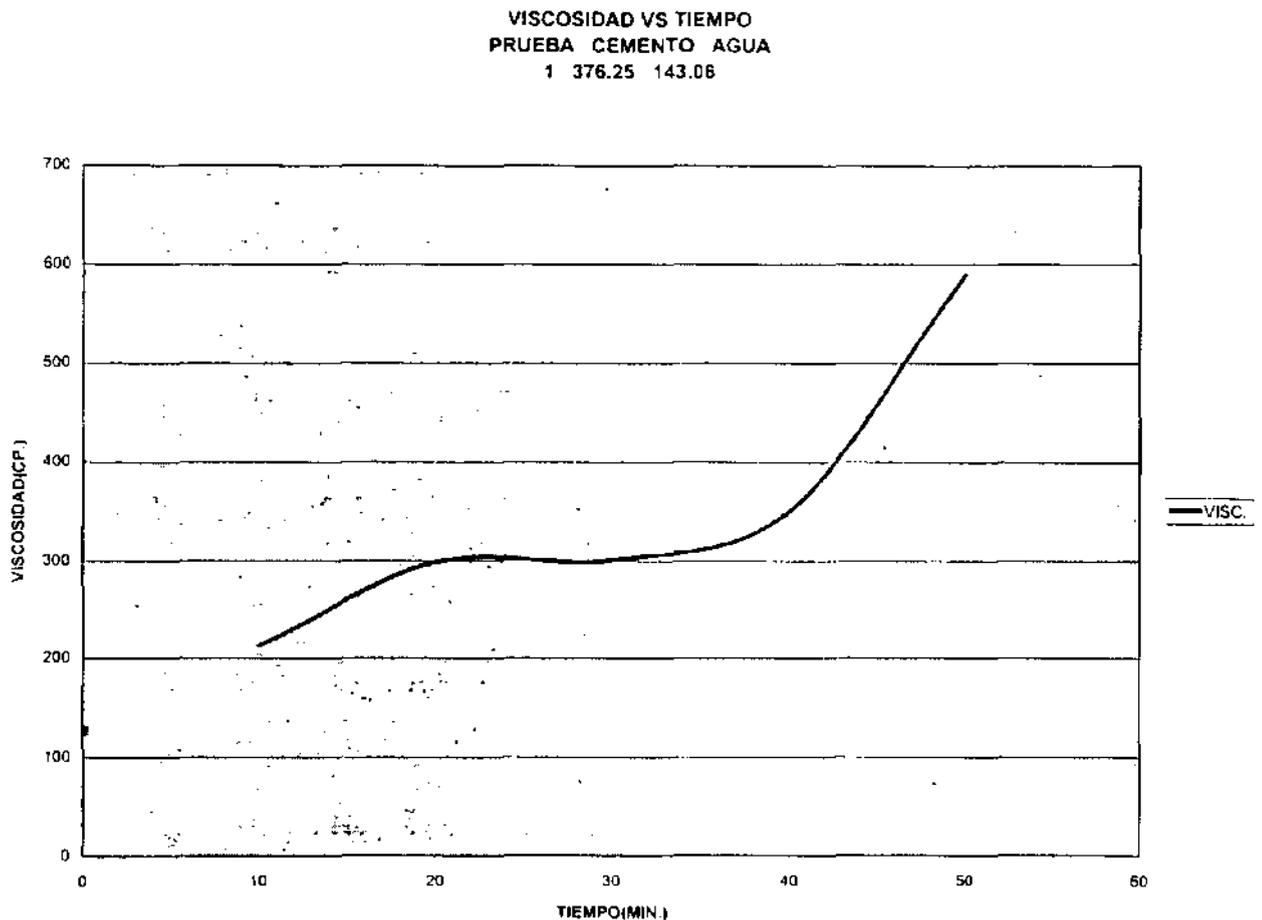


Figura 4.8 Viscosidad aparente contra tiempo de la prueba No. 1

La figura 4.8 es característica del comportamiento tixotrópico de una lechada de cemento en la cual se distinguen tres etapas: La reacción inicial de inducción (formación de complejos para la reacción), la zona estable de la lechada de cemento y la reacción final de reticulación en donde solo dominan los geles de reacción, inicialmente se adelgazan.

VISCOSIDAD VS TIEMPO
 PRUEBA CEMENTO AGUA TIXOTRÓPICO
 2 376.25 143.06 0.875

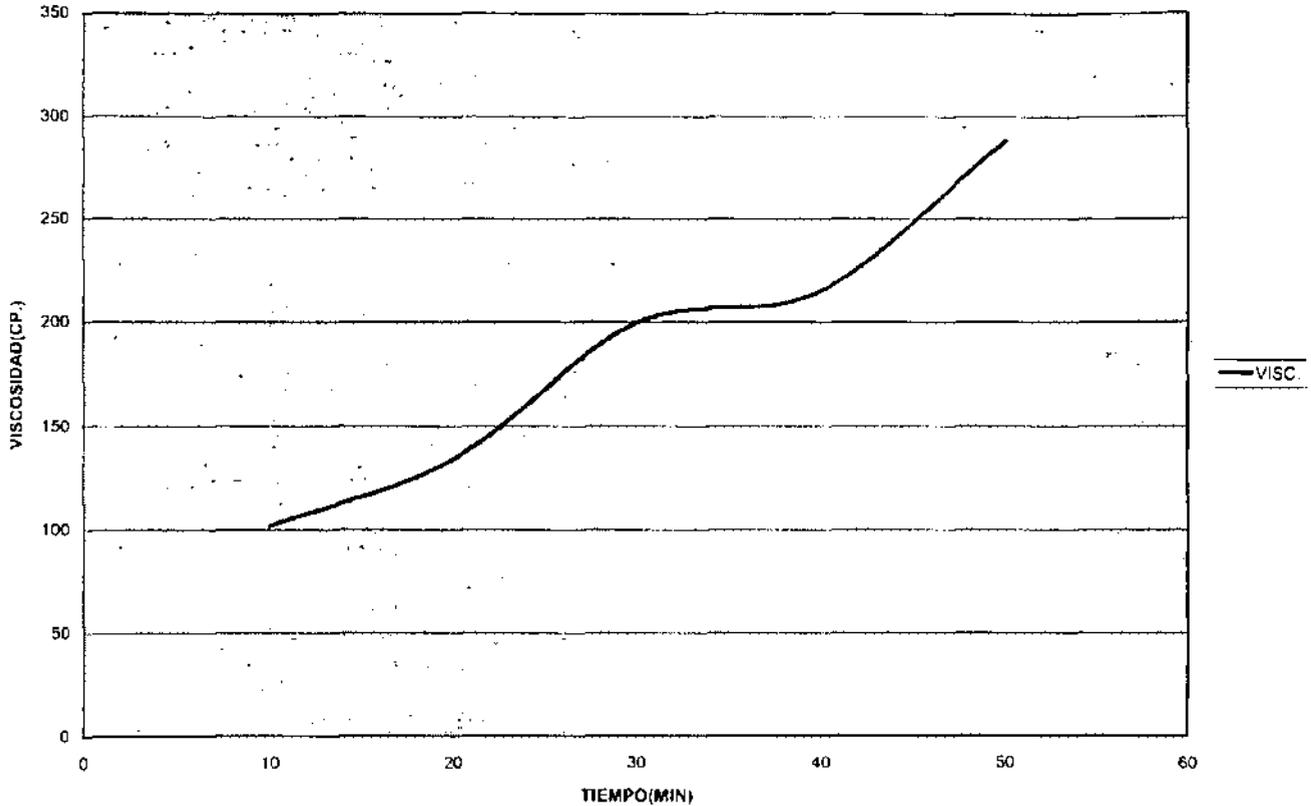


Figura 4.9 Viscosidad aparente contra tiempo de la prueba No. 2

En la figura 4.9 se observa como aumentan los puntos de inflexión lo que evidencia la formación y destrucción de geles tixotrópicos. Al inicio de la hidratación dominan los geles tixotrópicos, después se combinan con los geles de la reacción y finalmente conforme aumenta el tiempo dominan los geles de la reacción.

VISCOSIDAD VS TIEMPO
PRUEBA CEMENTO AGUA RETARDADOR
5 376.25 143.06 0.4375

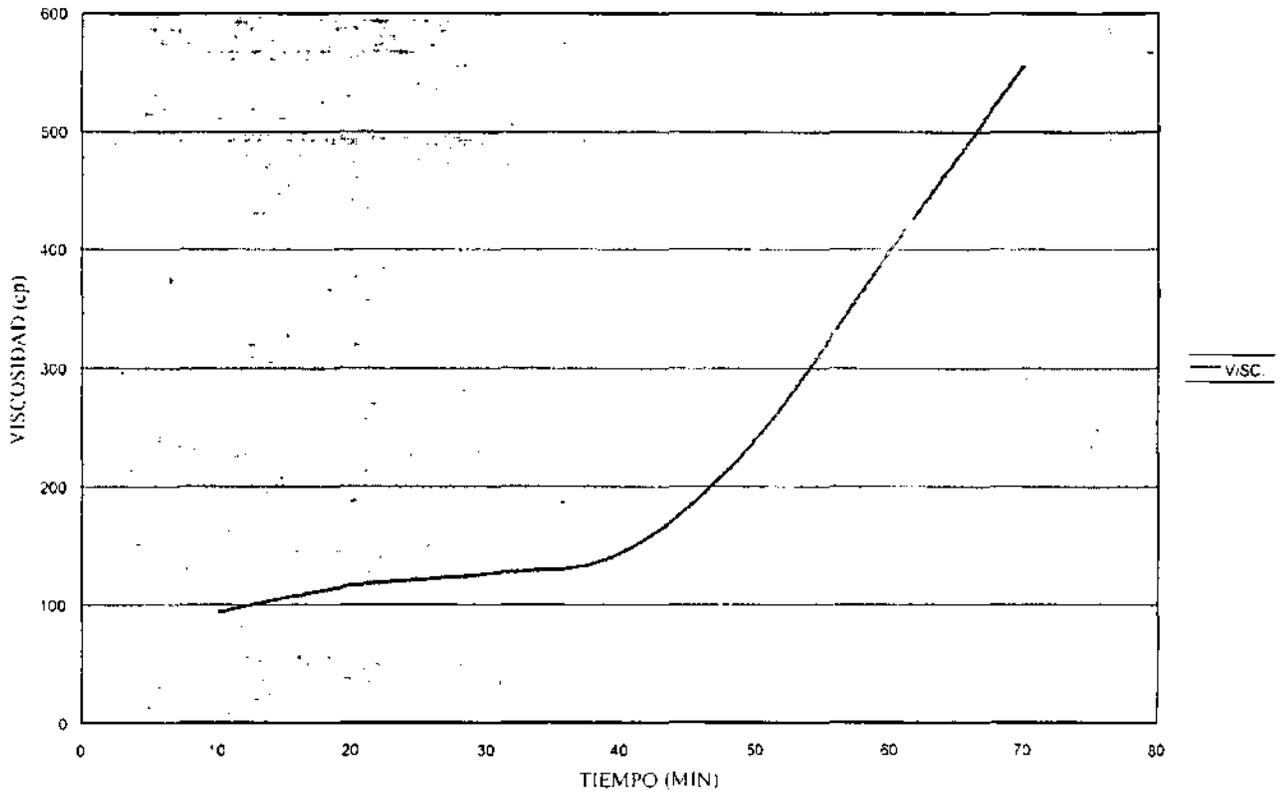


Figura 4.10 Viscosidad aparente contra tiempo de la prueba No. 5

En la figura 4.10 se observa como el retardador impide la etapa de inducción al inicio de la hidratación y como la aplaza en el tiempo seguida de la reacción final, la cual avanza lentamente con respecto a la figura 4.7, solo dominan los geles de la reacción.

VISCOSIDAD VS TIEMPO
 PRUEBA CEMENTO AGUA TIX-RET
 8 376.25 143.06 .875-4375

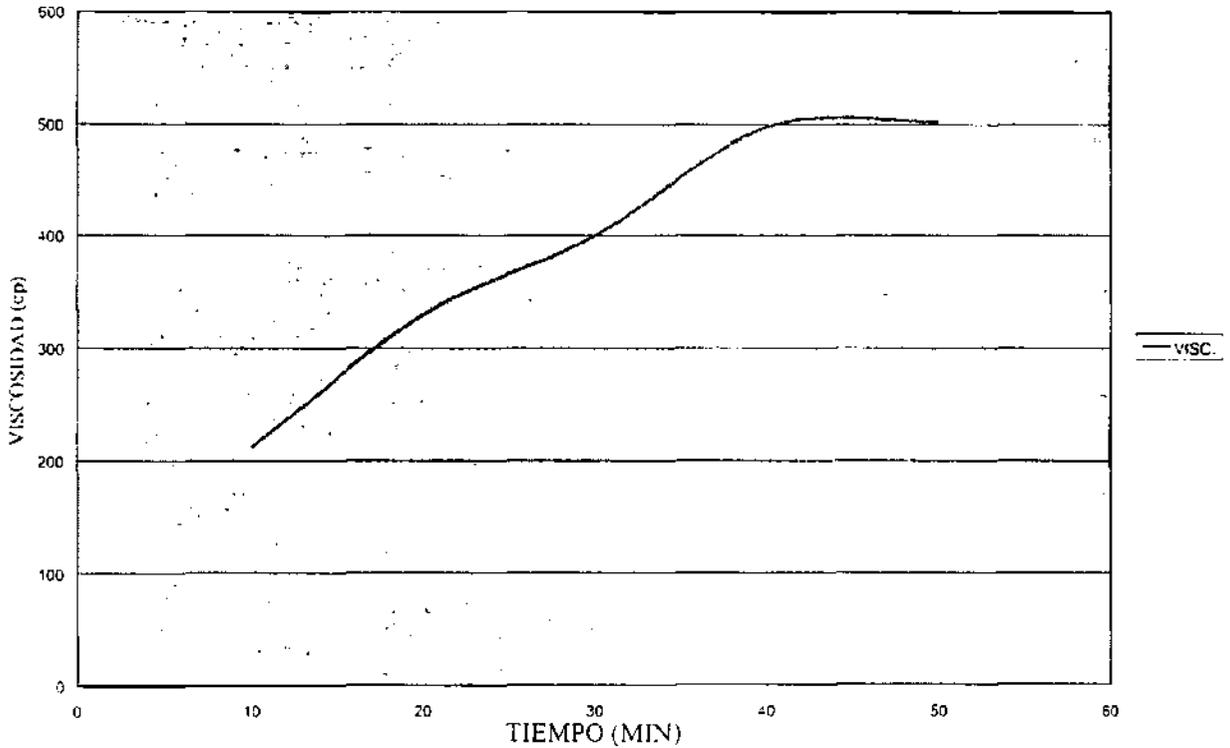


Figura 4.11 Viscosidad aparente contra tiempo de la prueba No. 8

En la figura 4.11 se observa como los puntos de inflexión son atenuados por el retardador ya que durante un lapso de tiempo son eliminados los efectos de los geles de la reacción y solo actúan los geles tixotrópicos.

En la figura 4.12 se agrupan las gráficas de viscosidad contra tiempo de las pruebas restantes donde se puede observar un comportamiento similar al descrito.

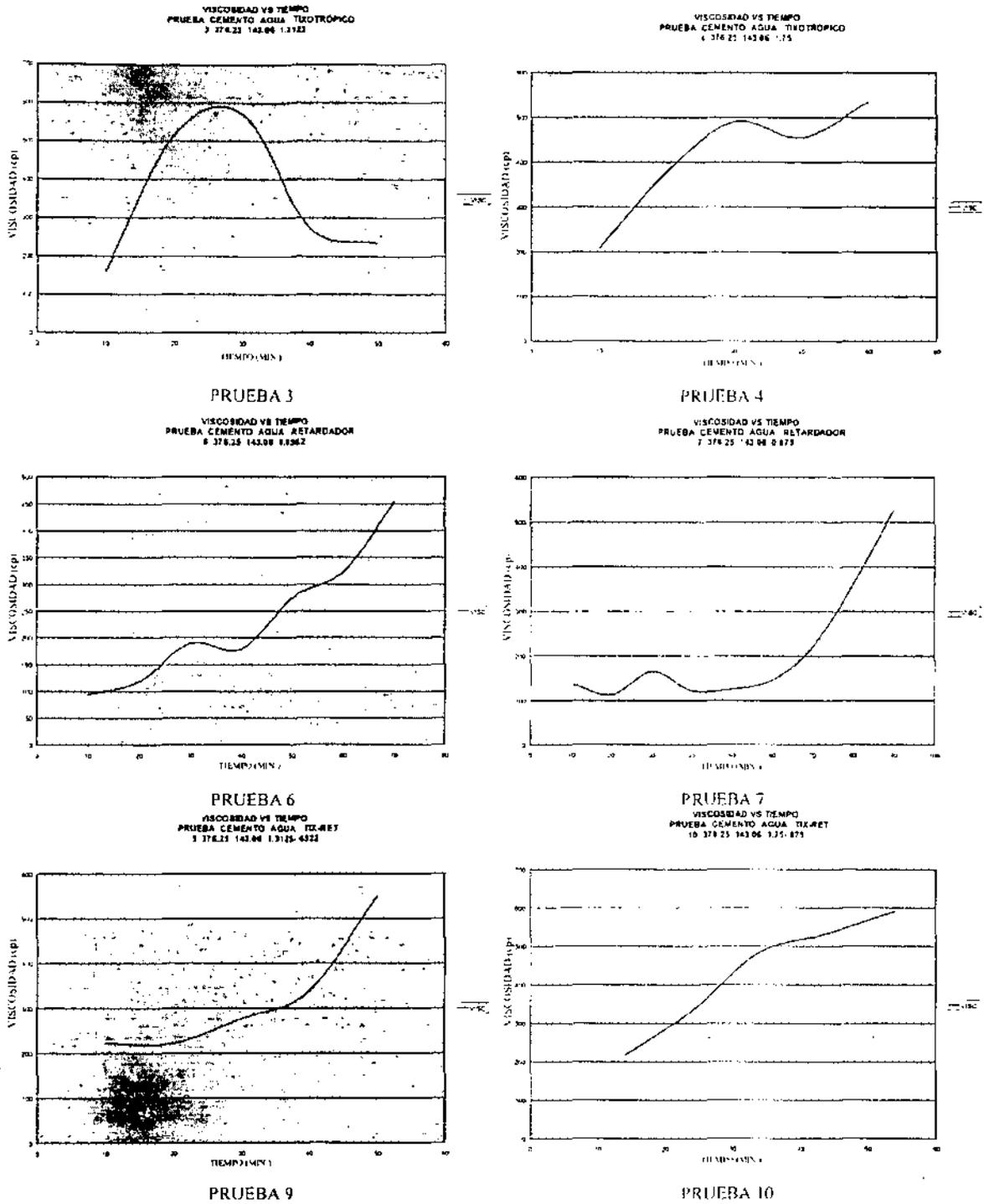


Figura 4.12 Viscosidad aparente contra tiempo de las pruebas Nos. 3, 4, 6, 7, 9 y 10

4.3 Modelado

A continuación se presenta el desarrollo y obtención de dos modelos reológicos, uno operativo y otro generalizado. Este trabajo centra su atención en el modelo operativo por razones de aplicación inmediata, al orientar su capacidad predictiva a secciones específicas de interés del proceso de cementación, como son la tubería de perforación y el espacio anular. Al mismo tiempo se presenta como subproducto de investigación un modelo generalizado con la finalidad de incluir todo el intervalo de esfuerzos y velocidades de corte posibles en el proceso de cementación en zonas con pérdida de circulación, al considerar que en esta zona las condiciones frontera en el tiempo para las velocidades son equivalentes a las de las presas de lodos ²³.

Para obtener el modelo de la lechada de cemento se analizaron cada una de las pruebas realizadas, eligiendo la prueba núm. 9 para efectuar el análisis estadístico. El motivo de dicha elección fue que esta prueba representa el comportamiento de la lechada de cemento con los aditivos tixotrópico y retardador en su nivel medio de concentración. Además, se puede observar como se redujo el tiempo bombeable con respecto a la prueba núm. 6 en la cual solo se le agregó a la lechada de cemento 0.6562 de retardador sin aditivo tixotrópico.

En la prueba mencionada anteriormente se aumento el número de mediciones a fin de que las velocidades de corte para el modelo operativo representen las características de colocación de las lechadas de cemento en campo de acuerdo al intervalo siguiente: 51 a 510 s⁻¹ (30 a 300 RPM). Los valores que se presentan en la tabla 4.5 son el resultado promedio de dos pruebas a las mismas condiciones operativas.

TIEMPO (MIN.)	VELOCIDAD (S ⁻¹)										
	51	85	119	153	170	187	204	255	340	425	510
10	100*	136	170	204	218	209	210	207	205	212	228
20	89	98	115	125	135	138	143	156	186	204	219
30	130	142	158	177	188	198	209	223	255	276	289
40	180	198	208	224	234	240	246	261	287	317	350
50	390	417	471	511	527	517	506	487	496	521	574

*Esfuerzos de corte en lb/100pie²

Tabla 4.5 Lecturas obtenidas en el viscosímetro Fann 70 de la prueba núm. 9 usadas para el modelo operativo.

Estos datos se utilizaron para obtener el modelo reológico de la lechada de cemento en función del tiempo, debido a que representa las condiciones operativas en que se realizan las cementaciones en el activo Cantarell. Además, contiene la cantidad media de aditivos empleados en campo (tixotrópico y retardador). En la figura 4.13 se presenta la gráfica del esfuerzo de corte contra la velocidad de corte de la prueba anterior a los diferentes tiempos.

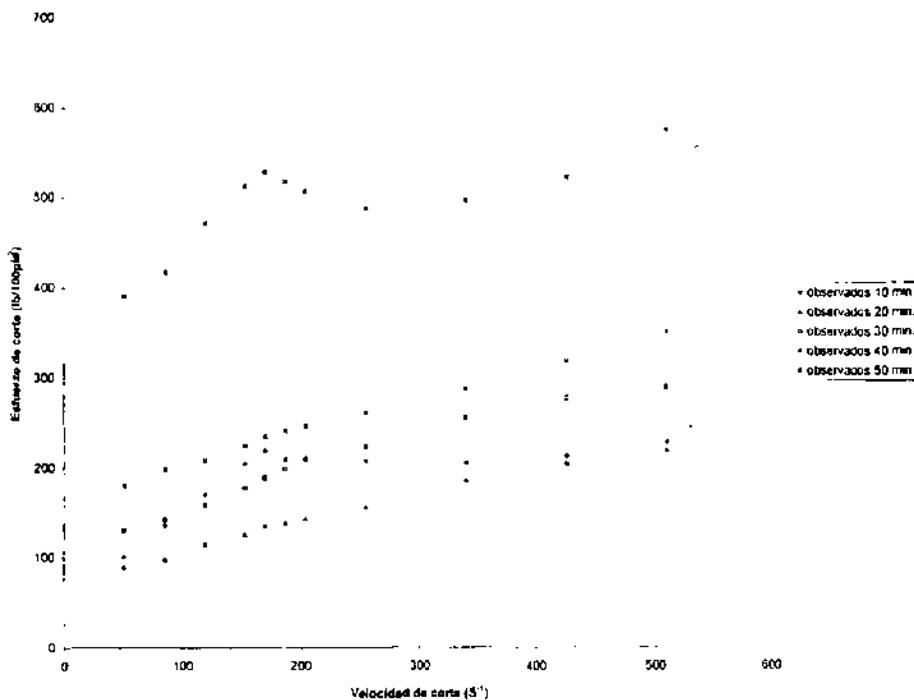


Figura 4.13 Gráfica del esfuerzo de corte contra la velocidad de corte a los diferentes tiempos de la tabla 4.5.

4.3.1 Modelo operativo

Análisis estadístico

El objetivo del análisis estadístico es determinar una relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte en función del tiempo, matemáticamente esto es:

$\tau = f(t, \gamma)$; donde, t es el tiempo y γ es la velocidad de corte.

De la figura 4.13 se observó que el comportamiento del modelo operativo es similar a un comportamiento Plástico de Bingham en función del tiempo, para esto se probaron diferentes ajustes, por ejemplo Ley de potencias, dando un mejor ajuste el modelo Plástico de Bingham. Se desarrollo la correlación entre las variables que caracterizan la deformación de la lechada de cemento, es decir, el esfuerzo de corte y velocidad de corte de acuerdo a la relación potencia del modelo,

$$\tau_D = \alpha_D \gamma_D + \beta_D \dots \dots (4.1)$$

donde:

τ_D = Esfuerzo de corte

γ_D = Velocidad de corte

α_D y β_D = Parámetros materiales

Como se menciona al inicio del capítulo las correlaciones se realizaron empleando los datos de la prueba 9 modificada con 11 velocidades de corte, tiempos de 10, 20, 30, 40 y 50 minutos y 8% de tixotrópico más retardador del total de la muestra de cemento. Para el análisis estadístico se hizo uso del software estadístico SPSS y STATISTICA.

La forma expresada en la relación (4.1) fue utilizada para determinar los parámetros α y β en cada nivel de tiempo, esto es:

$$\alpha_{10}, \alpha_{20}, \alpha_{30}, \alpha_{40}, \alpha_{50} \text{ y}$$

$$\beta_{10}, \beta_{20}, \beta_{30}, \beta_{40} \text{ y } \beta_{50}$$

Donde los subíndices 10, 20... 50 denotan los tiempos de cada lectura tomada para el esfuerzo de corte.

Debido a que los parámetros materiales α y β obtenidos son función de un tiempo puntual, es entonces que se procede a obtener una generalización en función de cualquier tiempo desarrollando las funciones $\alpha(t)$ y $\beta(t)$ que determinan el comportamiento de flujo al considerar los efectos por tixotropía y reacción química ($\alpha(t)$ es análoga a la viscosidad plástica y $\beta(t)$ al esfuerzo de cedencia del modelo Plástico de Bingham convencional, pero en este caso son en función del tiempo).

Por lo tanto, la relación (4.1) queda expresada como:

$$\tau = \alpha(t)\gamma + \beta(t) \dots \dots (4.2)$$

Los valores de ajuste obtenidos del software Statistic para α y β en los diferentes valores de tiempo se muestran en la tabla 4.6.

(MIN)	ALFA	BETA	PROPORCIÓN DE VARIANZA	R
10	0.18932	147.808	0.47471	0.68899
20	0.289047	80.51548	0.98418	0.99206
30	0.360463	122.2004	0.9633	0.9815
40	0.356526	168.5492	0.99455	0.99727
50	0.268306	431.5004	0.56138	0.74925

Tabla 4.6 Obtención de los parámetros α y β mediante el software estadístico Statistica 5.1

La comparación entre los valores observados y los del modelo para un tiempo puntual se puede observar en la figura 4.14 (t=40 minutos).

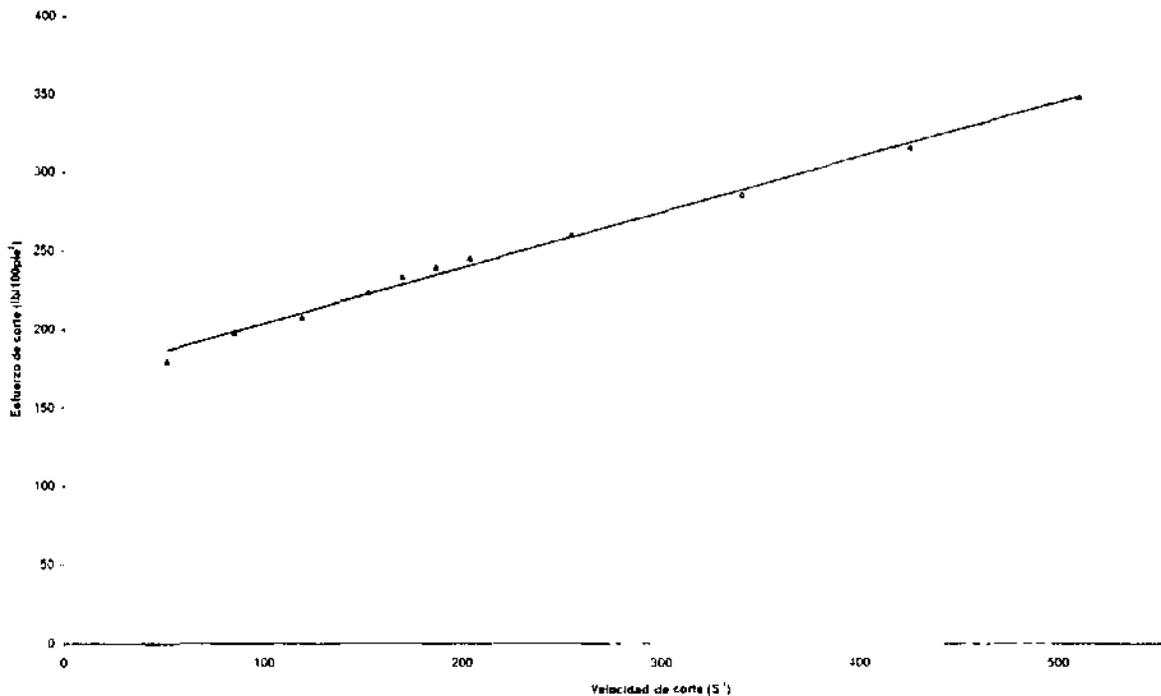


Figura 4.14 Ajuste parcial del modelo operativo en función del esfuerzo de corte y de la velocidad de corte, para t=40 min.

De forma similar se hizo una correlación entre los factores α y β , para obtener la generalización antes mencionada con respecto al tiempo, utilizando el software estadístico SPSS 8.0, la relación de aproximación entre α y el tiempo y β y el tiempo manifiestan un comportamiento cúbico, obteniendo las siguientes ecuaciones, con sus respectivos valores de los coeficientes:

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 \dots (4.3)$$

donde:

$$\alpha_0 = 0.061834$$

$$\alpha_1 = 0.013205$$

$$\alpha_2 = -0.0000239$$

$$\alpha_3 = -0.00000299$$

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 \dots (4.4)$$

donde:

$$\beta_0 = 175.389856$$

$$\beta_1 = -0.0786058$$

$$\beta_2 = -0.332079$$

$$\beta_3 = 0.008969$$

Para comprobar el ajuste de los modelos de regresión se aplicó un análisis de varianza a un nivel de significancia del 0.05, planteando las hipótesis siguientes²⁴:

$$H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0 \text{ y } \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0 \Rightarrow \textit{Propiedades reológicas independientes del tiempo}$$

$$H_1 = \text{Al menos una } \alpha_i \text{ y/o } \beta_i \text{ es diferente de cero} \Rightarrow \textit{Propiedades reológicas dependientes del tiempo}$$

El criterio para decidir si la hipótesis describe adecuadamente los datos es empleando el estadístico de Fisher siguiente:

$$F_{\text{calculado}} = \text{SSR/MSE}$$

donde:

SSR= suma de los cuadrados de la regresión

MSE= media de los cuadrados del error

Sí $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tablas}}$, se acepta la hipótesis nula H_0 . Para este caso, las alfas obtuvieron los valores siguientes: $F_{\text{calculado}} = 133.64967$ y la $F_{\text{tablas}} = 0.0636$, por lo que aceptamos la hipótesis H_1 y concluimos que el modelo describe adecuadamente los datos en función del tiempo.

En forma similar se hizo el análisis para las coeficientes beta (ecuación 4.4), obteniendo un $F_{\text{calculado}} = 17.66471$ y la $F_{\text{tablas}} = 0.1727$, concluimos que el modelo también describe adecuadamente los datos y se acepta la hipótesis H_1 .

La figura 4.15 muestra la gráfica del modelo operativo y de los valores observados de la prueba núm. 9 a un tiempo de 40 minutos, utilizando los valores de α y β en función del tiempo, en la cual se puede observar el ajuste del modelo.

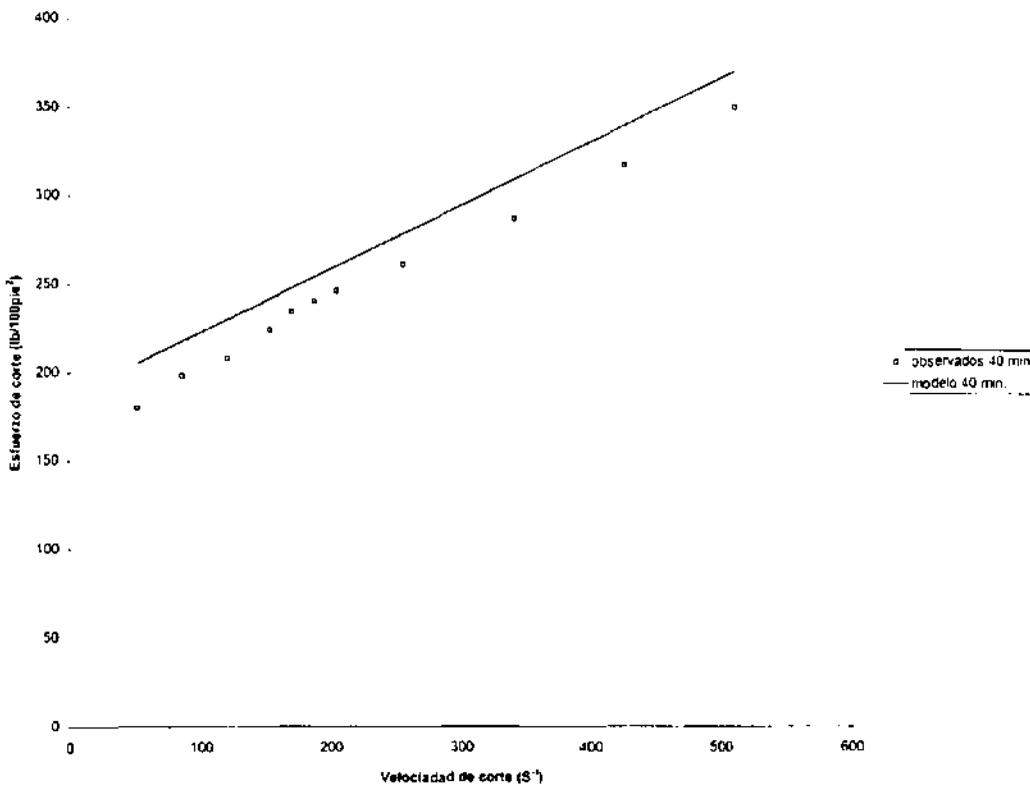


Figura 4.15 Ajuste del modelo operativo propuesto con respecto a los valores observados de la prueba no. 9, para un tiempo de 40 min.

El modelo operativo propuesto es el siguiente:

$$\tau = (\alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3) \gamma + (\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3) \dots\dots (4.5)$$

El modelo considera el esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte y del tiempo a condiciones promedio de presión y temperatura de pozo del Activo Cantarell, para velocidades de corte que simulan las operaciones de cementación. Este modelo tiene una capacidad de predicción del 92.4%. Las curvas para los diferentes tiempos que restan y las corridas del paquete estadístico se pueden consultar en el apéndice D.

4.3.2 Modelo generalizado

Análisis estadístico

Los datos de la prueba núm. 9 empleados para el modelo generalizado se muestra en la tabla siguiente:

TIEMPO (MIN)	VELOCIDAD (seg-1)									
	3.4	5.1	6.8	10.2	13.6	17.0	170.0	340.0	510.0	1020.0
10	236.9	87.1	106.1	111.0	113.1	113.1	227.9	213.0	237.5	301.1
20	51.2	35.4	37.6	35.4	35.4	35.4	143.0	195.5	236.4	330.3
30	245.4	48.9	46.5	46.5	48.9	51.2	197.6	266.5	295.3	377.5
40	251.8	106.1	113.1	125.9	130.2	129.3	245.4	292.4	360.6	488.7
50	156.0	202.7	207.0	165.8	151.5	168.6	533.5	506.0	586.9	612.5

Tabla 4.7 Lecturas obtenidas en el viscosímetro Fann 70 de la prueba núm. 9 usadas para el modelo generalizado.

Se siguieron las mismas etapas de análisis del modelo previo, haciendo corridas con diferentes modelos, probándose para este caso que el mejor ajuste lo presentó el Ley de potencias, lo cual se puede ver en la figura 4.16, la cual muestra el comportamiento de los valores experimentales de la tabla 4.7.

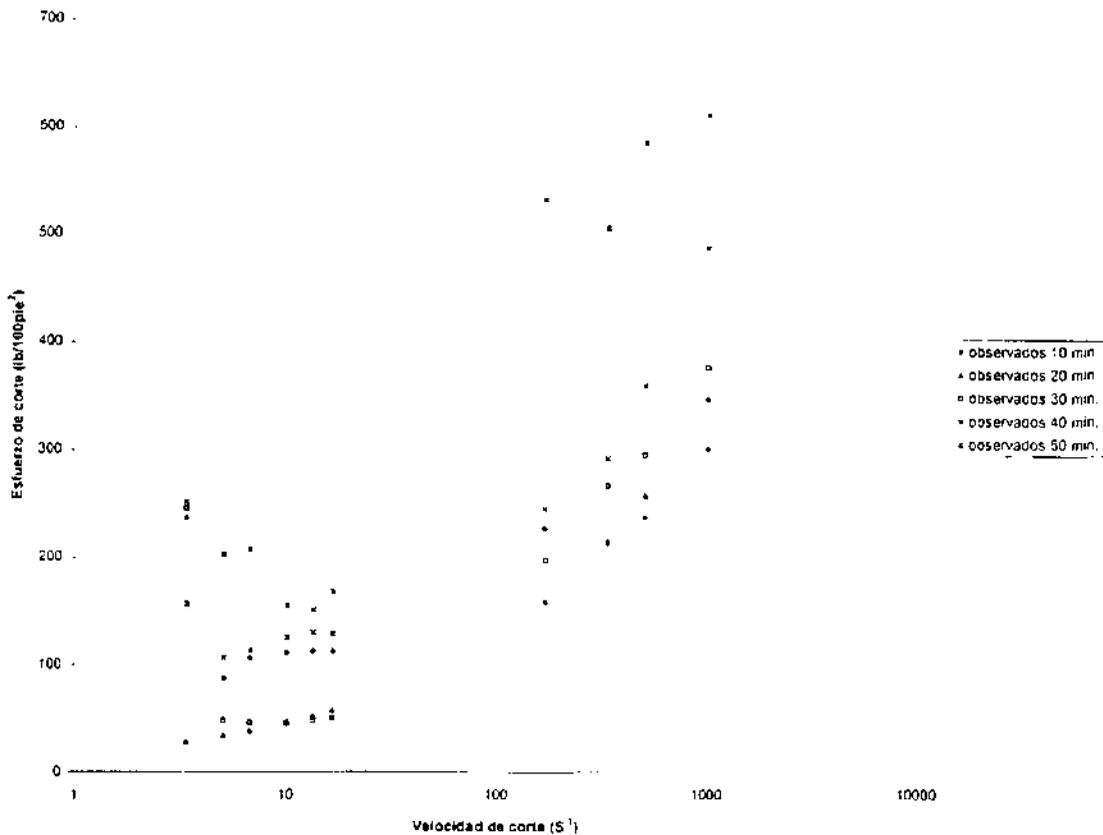


Figura 4.16 Esfuerzos de corte contra velocidades de corte de la tabla 4.7

Los valores de ajuste para α y β en los diferentes niveles de tiempo obtenidos del software Statistic se muestran en la tabla siguiente:

TIEMPO (MIN)	PARÁMETRO			
	ALFA	BETA	PROPORCIÓN DE VARIANZA	R
10	91.99609	0.159274	0.603733	0.777003
20	13.2406	0.463269	0.988908148	0.9944386
30	35.72401	0.330074	0.719074135	0.847982391
40	78.0529	0.248742	0.807885518	0.89882452
50	108.9964	0.262382	0.920951221	0.959662035

Tabla 4.8 Obtención de los parámetros α y β mediante el software estadístico Statistic 5.1

Para un tiempo de 20 minutos, se muestra en la figura 4.17 el comportamiento del modelo a un tiempo puntual con respecto a los valores observados.

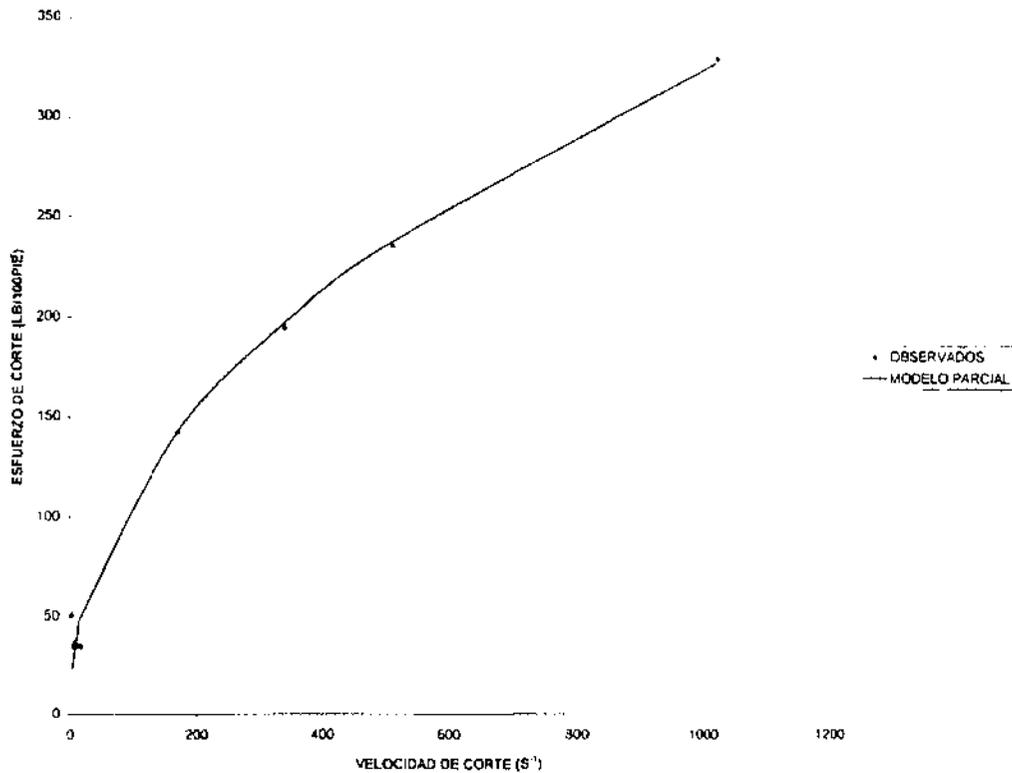


Figura 4.17 Ajuste parcial del modelo generalizado en función del esfuerzo de corte y de la velocidad de corte, para $t = 20$ min.

Para este modelo como para el anterior, la relación de aproximación de α y β respecto a cualquier tiempo tiene un comportamiento cúbico como el de las ecuaciones 4.3 y 4.4, en este caso los valores de los coeficientes son los siguientes, respectivamente:

$$\alpha_0 = 311.653860$$

$$\alpha_1 = -31.243177$$

$$\alpha_2 = 1.012713$$

$$\alpha_3 = -0.009385$$

y

$$\beta_0 = -0.714209$$

$$\beta_1 = 0.127240$$

$$\beta_2 = -0.004369$$

$$\beta_3 = 0.0000443468$$

Los valores estadísticos de Fisher para las alfas son:

$$F_{\text{calculado}} = 37.42361 \text{ y la } F_{\text{tablas}} = 0.1195$$

Y para las betas son:

$$F_{\text{calculado}} = 5.66756 \text{ y la } F_{\text{tablas}} = 0.2973$$

De acuerdo a las hipótesis H_0 y H_1 planteadas anteriormente y aplicables a este caso se concluye, que se rechaza H_0 y se acepta H_1 , es decir existe la dependencia del tiempo²⁴ en las propiedades reológicas y el modelo describe adecuadamente los datos observados.

La figura 4.17 muestra la gráfica del modelo generalizado en función del tiempo con respecto a los valores observados a un tiempo de 20 minutos.

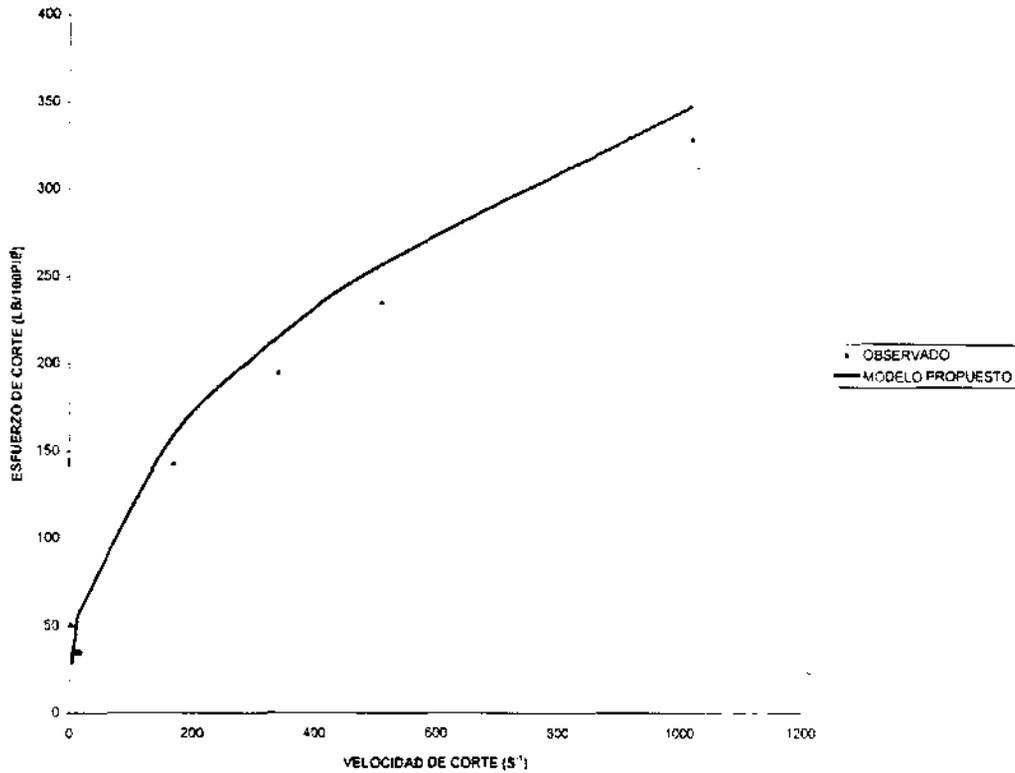


Figura 4.18 Ajuste del modelo generalizado propuesto con respecto a los valores observados de la prueba no. 9, para un tiempo de 20 min.

El modelo generalizado propuesto es el siguiente:

$$\tau = (\alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3) \gamma^{(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3)} \dots (4.6)$$

El modelo generalizado considera el esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte y del tiempo a condiciones promedio de presión y temperatura de pozo del Activo Cantarell, para velocidades de corte que simulan la cementación de las zonas de pérdida de circulación. Este modelo tiene una capacidad de predicción del 87.47%. Las curvas para los diferentes tiempos que restan y las corridas del paquete estadístico se pueden consultar en el apéndice D.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Se desarrollaron dos modelos reológicos, operativo y generalizado, para las lechadas de cemento, que consideran:
 - ✓ A la lechada de cemento como un flujo reactivo, es decir, su reología es dependiente del tiempo.
 - ✓ El cambio de fase de líquido a sólido de la lechada.
 - ✓ Los efectos dinámicos de los geles, propios de la tixotropía (proceso reversible) y de la reacción de hidratación (proceso irreversible).
 - ✓ La presión y la temperatura a condiciones promedio del campo Cantarell, para la cementación de liners de 9 5/8".
2. Los modelos lograron capacidad predictiva y de reproducción del fenómeno de acuerdo al análisis de varianza. El modelo operativo mostró el mejor ajuste acorde al modelo Plástico de Bingham, en tanto que el modelo generalizado al modelo Ley de potencias.
3. El modelo operativo orienta su capacidad predictiva a secciones específicas de la colocación de la cementación en campo, como son el interior de la tubería de perforación y el espacio anular, siendo su aplicación inmediata. El modelo tiene una precisión del 92.4%.
4. El modelo generalizado incluye todo el intervalo de esfuerzos y velocidades de corte y puede ser utilizado en investigaciones posteriores para la cementación en zonas con pérdida de circulación, siendo su precisión del 87.47%.

Recomendaciones

1. Para incrementar la precisión del modelo se sugiere:
 - ✓ Modificar la geometría del bulbo del viscosímetro empleado por uno del tipo de paletas, para aislar el fenómeno de deslizamiento de la lechada de cemento sobre las paredes del bulbo. Así como, realizar las adecuaciones al equipo que permitan aumentar el número de mediciones en forma automatizada.
 - ✓ Corregir el defasamiento que existe entre lo predecido y lo experimental por medio de un factor de corrimiento que involucre la concentración de los aditivos empleados.
2. Es importante obtener relaciones de este modelo explícitas en presión y temperatura dependiente del tiempo, sobre todo de presión para altas relaciones cemento –agua debido al fenómeno de aglomerados.

NOMENCLATURA

A	=	Parámetro de ajuste del modelo de Eyring
a	=	Parámetro de ajuste del modelo de Sisko
B	=	Parámetro de ajuste del modelo de Eyring
b	=	Parámetro de ajuste del modelo de Sisko
C	=	Parámetro de ajuste del modelo de Ellis
C ₃ S	=	Silicato tricálcico
C ₂ S	=	Silicato dicálcico
C ₃ A	=	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	=	Aluminoferrita tetracálcica
c	=	Parámetro de ajuste del modelo de Sisko
D	=	Parámetro de ajuste del modelo de Reiner-Phillippopff
dV_x/d_y	=	Velocidad de corte, s^{-1}
K	=	Índice de consistencia, lb-seg/(100pies ²).
N	=	Índice de comportamiento de flujo, adimensional
Uc	=	Unidad de consistencia
α	=	Parámetro de ajuste del modelo de Ellis
α_C	=	Parámetro de ajuste del modelo de Cross
α_D	=	Viscosidad plástica, cp.
β_D	=	Punto de cedencia, lb/100pie ²
$\alpha_D(t)$	=	Función material del modelo propuesto en función del tiempo, puede ser cp o lb-seg/(100pies ²), según el modelo.
$\beta_D(t)$	=	Función material del modelo propuesto en función del tiempo, lb/100pie ² o adimensional, según el modelo.
γ_D	=	Velocidad de corte del modelo propuesto, s^{-1}
μ	=	Viscosidad, centipoises
μ_A	=	Parámetro de ajuste del modelo de Meter
μ_{ap}	=	Viscosidad aparente, centipoise
μ_B	=	Parámetro de ajuste del modelo de Meter
μ_C	=	Parámetro de ajuste del modelo de Cross
μ_{CO}	=	Parámetro de ajuste del modelo de Cross
μ_P	=	Viscosidad plástica, centipoises
μ_R	=	Parámetro de ajuste del modelo de Reiner-Phillippopff
μ_0	=	Parámetro de ajuste del modelo de Ellis
μ_α	=	Parámetro de ajuste del modelo de Reiner-Phillippopff
τ_A	=	Parámetro de ajuste del modelo de Meter
τ_D	=	Esfuerzo de corte del modelo propuesto, lb/100pie ²
τ_0	=	Punto de cedencia, lb/100pie ² ó pascales
τ_{xy}	=	Esfuerzo de corte, lb/100pie ² ó pascales
τ_y	=	Punto de cedencia, lb/100pie ²

REFERENCIAS

- 1.- Blanco Galan Jaime, "El cemento y su control de calidad", Tesis profesional de Ingeniería Petrolera, UNAM, México, 1997.
- 2.- Nelson Erik B., " Well cementing", Dowell Schlumberger, Z.I. de Molina la Chazotte 42000 St. Etienne, France, 1990.
- 3.- Chatterji S. "Electron-optical and x-ray diffraction investigation of the effects of lignosulphonates on the hydration of C_3A ", Indian concrete J., 1967.
- 4.- Blank B., Ressington D.R. and Weiland L.A.: "Adsorption of admixture of Portland cement", J. Amer. Ceramic Soc., 1963.
- 5.- Bruere G.M.: "Set retarding effects of sugar in Portland cement pastes", Nature, 1966.
- 6.- Arliguie G. y Grandet J.: "Etude par calorimetrie de l'hydratation de ciment Portland en presence de zinc", Cement and Concrete Res., 1985.
- 7.- Clement C.C. "A scientific approach to the use of thixotropic cement", JPT, 1979.
- 8.- Wieland D.R., Calvert D.G. and Spangle L.B.: "Desing of special cement systems for areas whit low fracture gradients", SPE 2556, 1969.
- 9.- Childs J., Sabins F. y Taylor M.J., "Method of using thixotropic cements for combating lost circulation problems", USP, 1985.
- 10.- Waterford oil tool, "Una guía para cementaciones", Houston, Texas.

-
- 11.- Spangle L. B. y Calvert D. G., "Improved primary and remedial cementing with thixotropic cement system", SPE 3833, Denver, Colorado, 1972.
 - 12.- Clark Clement, " A scientific approach to the use of thixotropic cement", SPE 6011, New Orleans, 1979.
 - 13.- Swayze M.A.: "Effects of high temperatures and pressures on strengths of oil well cements", Drill. And Prod. Prac., API, Dallas, 1954.
 - 14.- Menzel C.A.: "Studies of high pressure steam curing of tamped hollow concrete block", J. Amer. Concrete Inst., 1935.
 - 15.- Italcementi S.: "Geotherm", Customer Brochure, 1977.
 - 16.- Malvern Instrument LTD, " Manual de instrucciones del equipo de dispersión de luz, Inglaterra.
 - 17.- León Loya Juan G., "Fundamentos de reología no-Newtoniana y viscosimetría capilar y rotacional", UNAM, México, D.F., 1992.
 - 18.- Capitanachi González Eusebio, "Apuntes de reología de fluidos no-Newtonianos", UNAM, México, D.F., 1999.
 - 19.- Rivera Rodríguez Jesús, "Apuntes de fenómenos de transporte", UNAM, México, D.F., 1998.
 - 20.- Guillot D.J. y Denis J.H.: "Prediction of laminar and turbulent friction pressures of cement slurries in pipes and centered annuli", SPE 18377, 1988.

- 21.- Cortes I, "Modelo matemático para la descripción del comportamiento del deslizamiento hidrodinámico de polímeros semi-ligeros", Tesis de maestría en Ingeniería Química, IPN, México, 1996.
- 22.- Montgomery Douglas, "Diseño y análisis de experimentos", Grupo editorial Iberoamericana, tercera edición, 1991.
- 23.- Benitez M., Garaicochea F., Reyes C., "Apuntes de fluidos de perforación", Facultad de Ingeniería, UNAM, 1986.
- 24.- Lun Chou-Ya, "Análisis estadístico", Mc. Graw-Hill, segunda edición, 1992.

APENDICE A TÉCNICA DE ANÁLISIS FACTORIAL

Diseño factorial

Muchos experimentos se llevan a cabo para estudiar los efectos producidos por dos o más factores. Puede mostrarse que en general los diseños factoriales son los más eficientes para este tipo de experimentos. Por diseño factorial se entiende aquel en que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o replica del experimento.

Por ejemplo, si existen *a* niveles del factor A y *b* niveles del factor B, entonces cada replica del experimento contiene todas las *ab* combinaciones de los tratamientos. A menudo, se dice que los factores están cruzados cuando se éstos se arreglan en un diseño factorial.

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producida por un cambio en el nivel del factor. Con frecuencia, éste se conoce como efecto principal porque se refiere a los factores de interés primordial del experimento. Por ejemplo, consideremos los datos de la tabla A-1. El efecto principal del factor A podría interpretarse como la diferencia entre la respuesta promedio en el primero y segundo nivel de ese factor. Numéricamente,

$$A = \frac{40 + 52}{2} - \frac{20 + 30}{2} = 21$$

En otras palabras, incrementar el factor A del nivel 1 al 2 produce un cambio en la respuesta promedio de 21 unidades. Similarmente, el efecto principal de B es,

$$B = \frac{30 + 52}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 11$$

Si los factores tienen más de dos niveles, el procedimiento anterior debe ser modificado ya que las diferencias entre las respuestas promedio pueden expresarse de muchas formas.

En algunos experimentos puede encontrarse que la diferencia en la respuesta entre los niveles de un factor no es la misma en todos los niveles de los otros factores. Cuando esto ocurre existe una interacción entre los factores. Por

		Factor B	
		B ₁	B ₂
Factor A	A ₁	20	30
	A ₂	40	52

Tabla A1 Un experimento factorial

ejemplo, considérese los datos de la tabla A2. En el primer nivel del factor B, el efecto de A es,

$$A = 50 - 20 = 30$$

Mientras que en el segundo nivel de B, el efecto de A es,

$$A = 12 - 40 = -28$$

Puede observarse que existe una interacción entre los factores A y B porque el efecto de A depende del nivel elegido de B.

		Factor B	
		B ₁	B ₂
Factor A	A ₁	20	40
	A ₂	50	12

Tabla A2 Un experimento factorial con interacción

Hay que notar que cuando una interacción es grande los correspondientes efectos principales tienen poco significado práctico. Una estimación del efecto principal de A de los datos de la tabla A2 es,

$$A = \frac{50 + 12}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 1$$

el cual resulta ser muy pequeño corriéndose el riesgo de concluir que no existe un efecto debido a A. Sin embargo, cuando se examinó el efecto de A en niveles diferentes de B se concluyó que éste no era el caso. El factor A tiene un efecto, pero depende del nivel del factor B. En otras palabras, es más útil conocer la interacción AB que el efecto principal. Una interacción significativa oculta a menudo el significado de los efectos principales. Esto se muestra claramente en los datos de la tabla A2. Usualmente, para obtener conclusiones acerca del efecto principal de un factor, por ejemplo el de A, en presencia de una interacción significativa, el experimentador debe examinar los niveles de dicho factor, manteniendo fijos los niveles de los otros factores.

APENDICE B TÉCNICA DE ANÁLISIS DE VARIANZA

Análisis de varianza

Supongamos que desea comparar "a" tratamientos o niveles de un factor único. La respuesta que se observa en cada uno de los "a" tratamientos es una variable aleatoria. Los datos aparecerían como en la tabla B1. Una entrada de la citada tabla (por ejemplo, y_{ij} representa la j-ésima observación del tratamiento i.

En general, habrá n observaciones del tratamiento i. Obsérvese que la tabla B1 es el caso general de los datos del experimento de resistencia a la tensión. Es útil describir las observaciones mediante el modelo estadístico lineal

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \{i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, n, \dots\} (B1)$$

en donde y_{ij} es la (ij)-ésima observación, μ es un parámetro común a todos los tratamientos denominado media global, τ_i es un parámetro único para el i-ésimo tratamiento llamado efecto del tratamiento i-ésimo y ε_{ij} es el componente aleatorio del error. Nuestro objetivo será probar hipótesis apropiadas con respecto a los efectos del tratamiento y hacer una estimación de ellos. Para probar las hipótesis, se supone que los errores del modelo son variables aleatorias independientes con distribución normal, con media cero y varianza σ^2 . Se supone que esta última es constante para todos los niveles del factor.

Este modelo se denomina análisis de varianza de clasificación en un sentido porque sólo se investiga un factor. Además se requiere que el experimento se realice en orden aleatorio, de manera que el medio ambiente en el que se usan los tratamientos (llamados a menudo unidades experimentales) sea lo más uniforme posible. Por tanto, este diseño experimental es un diseño completamente aleatorizado.

Tratamiento (nivel)	observaciones				Totales	Promedios
1	Y_{11}	Y_{12}	.....	Y_{1n}	$Y_{1.}$	- $y_{1.}$
2	Y_{21}	Y_{22}	.....	Y_{2n}	$Y_{2.}$	- $y_{2.}$
...
a	Y_{a1}	Y_{a2}	.....	Y_{an}	$Y_{a.}$	- $y_{a.}$
					$Y_{..}$	- $y_{..}$

Tabla B1 Datos típicos para un experimento unifactorial

El modelo estadístico , ecuación B1, describe dos situaciones con respecto al efecto de los tratamientos. Primero, los "a" tratamientos podrían haber sido seleccionados específicamente por el experimentador. En esta situación se desea probar hipótesis sobre las medias de los tratamientos y las conclusiones se aplican sólo a los niveles del factor considerados en el análisis. Las conclusiones no pueden hacerse extensivas a tratamientos similares que no hayan sido considerados específicamente. También sería deseable estimar los parámetros del modelo (μ, τ_1, σ^2). Este modelo se denomina modelo de efectos fijos.

Alternativamente, los "a" tratamientos pueden ser una muestra aleatoria de una población mayor de tratamientos. En esta situación sería deseable generalizar las conclusiones (basadas en la muestra de tratamientos), a todos los tratamientos de la población, ya sea que hayan sido explícitamente considerados en el análisis o no. En este caso, las τ_1 son variables aleatorias y resulta relativamente inútil conocer sus valores particulares para los tratamientos investigados. En su lugar, se prueban hipótesis con referencia a la variabilidad de las τ_1 y se intenta dicha variabilidad. Esto se conoce como modelo de efectos aleatorios o de componentes de varianza.

APENDICE C: TÉCNICA DE ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Análisis de regresión

El análisis de regresión es una técnica estadística utilizada para investigar y explicar las relaciones entre variables de un experimento.

Quizás la aplicación más usual del análisis de regresión es la de predecir o estimar el valor de una variable con base a los valores, conocidos o supuestos, de otras variables. Una de las tareas más importantes en un análisis de regresión es la de determinar las variables que son más importantes para predecir la variable de interés, cuales tienen sólo una pequeña información relacionada con esta variable y cuales serían redundantes con otras variables.

Además de identificar que variables pueden utilizarse para estimar el valor de otra variable, el análisis de regresión también puede describir la manera en que las variables están relacionadas. Se puede utilizar el análisis de regresión para ver si la teoría es validada o refutada por la evidencia empírica.

Generalmente iniciamos con una idea o conjetura sobre la forma de la relación entre variables, con el análisis de regresión se puede verificar estas hipótesis e identificar las variables relevantes. Una vez que la forma de la relación esta determinada, el análisis de regresión se puede utilizar para estimar los valores de la variable de interés.

Los ingenieros y científicos a menudo utilizan ecuaciones para resumir o describir un conjunto de datos. El análisis de regresión es útil para describir tales ecuaciones.

En el análisis de regresión las variables que se utilizan para predecir se conocen como variables regresoras o variables predictoras, y la variable que se desea predecir es llamada variable de respuesta. Es común denotar las variables predictoras con la letra x , entonces x_1 denota el primer predictor, x_2 el segundo predictor, y así sucesivamente, se usan tantas variables predictoras como sea necesario o posible. La variable de respuesta se denota con la letra Y .

El caso más simple de un análisis de regresión es el de predecir una variable, denotada con Y , con base a sólo una variable, denotada con x . Una análisis de regresión en los que solo interviene una variable predictora se llama análisis de regresión simple. Estos modelos de regresión tienden a simplificar en gran medida las situaciones reales por lo que es necesario considerar modelos con dos o más variables predictoras. Cuando el análisis de regresión involucra dos o más variables predictoras se dice que es un análisis de regresión múltiple.

Regresión lineal y correlación

Sabiendo que $Y=B_0+B_1x$ es la ecuación de una línea recta, B_0 y B_1 son los parámetros de la línea recta; una vez que son conocidos, la línea recta esta completamente determinada. En esta ecuación todos los puntos están sobre una línea recta. Pero en muchos diagramas de dispersión no todos los puntos están en la línea recta, dicha ecuación representa un modelo determinístico en el sentido de que una vez que se escoge un valor para la x , el valor de Y es automáticamente determinado por los valores específicos de B_0 y B_1 .

Reconociendo que nunca podremos hacer predicciones exactas, definiremos la relación entre x y Y como un modelo probabilístico o estadístico, por tanto, $Y=B_0+B_1x+\xi$, en el cual ξ representa el error en nuestra predicción y nos indica que la relación $Y=B_0+B_1x$ no es exacta para todos los pares de observaciones.

El término error ξ consta de todas las variables que influyen en Y pero que no están incluidas como predictoras. También consta de aleatoriedad y variabilidad de la relación.

De hecho el término error está compuesto de dos clases generales de error:

- Error del modelo o de falta de ajuste, lo cual significa que todos los predictores relevantes no están especificados o que la forma de relación no es la correcta.
- Error aleatorio, este no es predecible ni controlable.

El modelo $Y=B_0+B_1x+\xi$ solo establece la estructura conceptual del problema y es una manera de decir que estamos estudiando un problema en el que hay una relación lineal imperfecta entre dos variables. Los valores exactos de B_0 , B_1 y ξ siempre serán desconocidos, lo que haremos es utilizar un conjunto de datos para encontrar estimaciones numéricas de B_0 y B_1 , las cuales denotaremos como B_0' y B_1' , así como para obtener la respuesta estimada Y simplemente al sustituir el valor del regresor x en la ecuación.

$$Y' = B_0' + B_1'x. \quad (C1)$$

Estimación de parámetros

Recordando que el modelo de regresión lineal simple $Y=B_0+B_1x+\xi$ indica que x y Y están linealmente relacionados, aún cuando esta relación no es exacta; para un problema dado necesitamos estimar B_0 y B_1 obteniendo así la ecuación de regresión o predicción $Y' = B_0' + B_1'x$ donde B_0' y B_1' son los valores numéricos y Y' es el valor estimado de Y para un valor dado de x . Como la relación lineal es imperfecta, también podemos estimar ξ , el tamaño del error de estimación.

Quizás el método más simple para determinar la ecuación de regresión es graficar una línea recta a través de la masa de puntos en el diagrama de dispersión para luego determinar la pendiente y el intercepto de ésta línea recta. Evidentemente este procedimiento no es nada efectivo y debemos buscar un mejor método para encontrar la línea de regresión, lo que necesitamos es un criterio para estimar la relación lineal existente en la muestra de puntos.

El objetivo es encontrar la línea $Y' = B_0' + B_1'x$ en la que los valores B_0' y B_1' hacen que la desviación cuadrática promedio de los puntos a la línea sea mínima. Para esto se utiliza el método de mínimos cuadrados para encontrar la mejor línea, la cual es, en promedio, cercana a todos los puntos.

APENDICE D GRÁFICAS Y PRUEBAS ESTADÍSTICAS COMPLEMENTARIAS

Modelo operativo en función del tiempo

Las figuras complementarias de los tiempos restantes del modelo operativo se muestran a continuación:

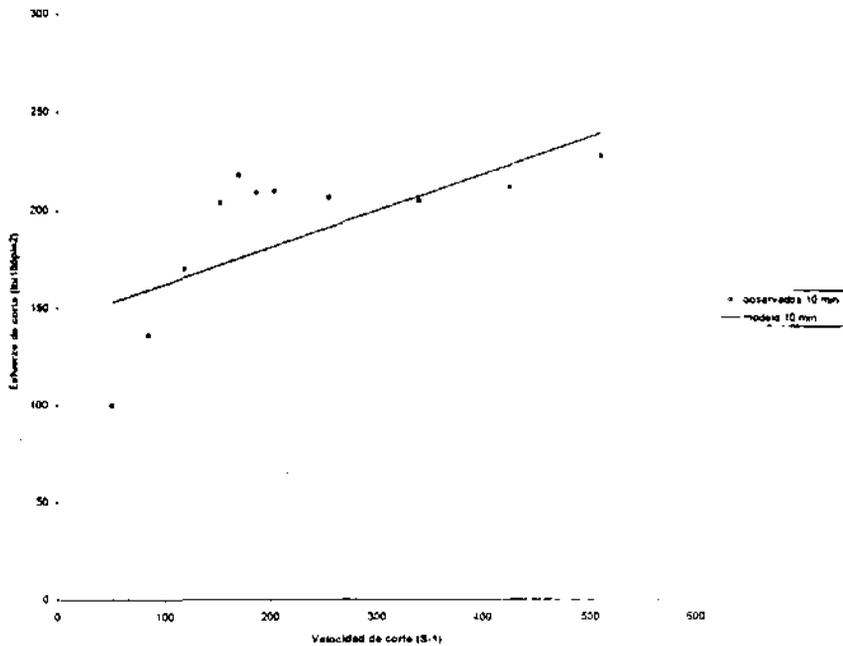


Figura D1 Esfuerzo contra la velocidad de corte del modelo operativo para un tiempo de 10 min.

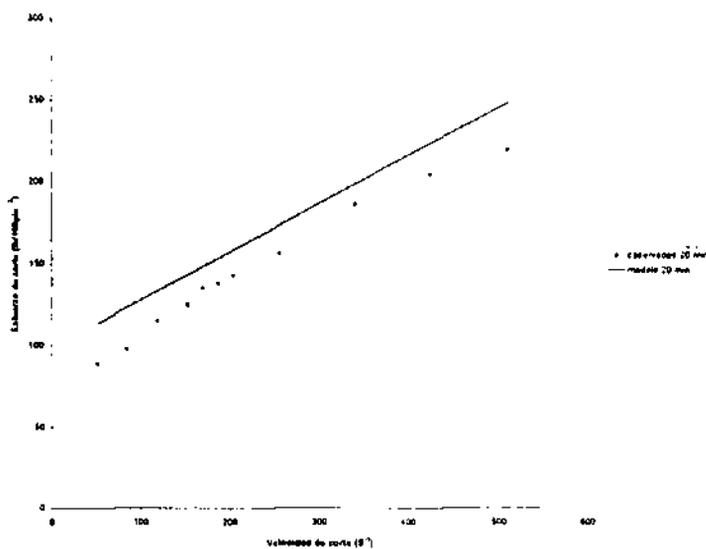


Figura D2 Esfuerzo contra la velocidad de corte del modelo operativo para un tiempo de 20 min.

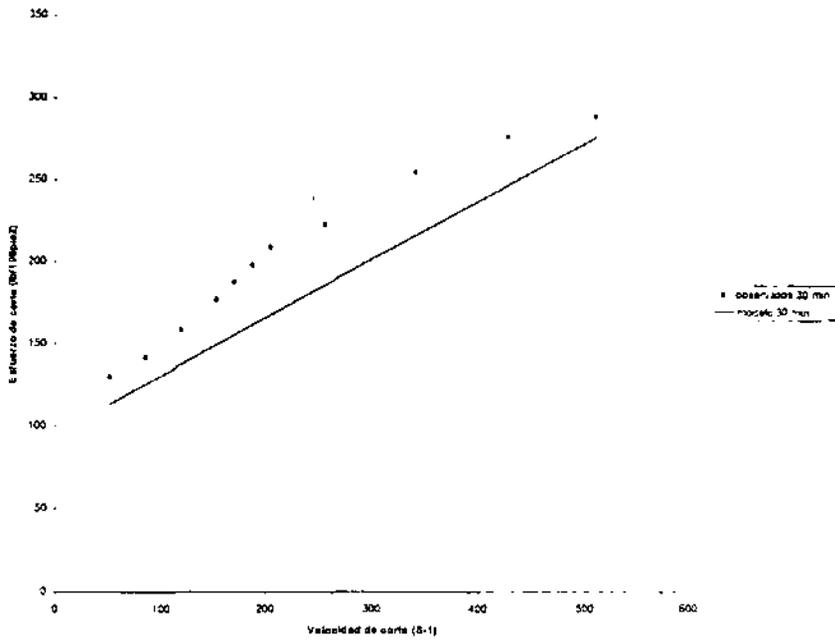


Figura D3 Esfuerzo contra la velocidad de corte del modelo operativo para un tiempo de 30 min.

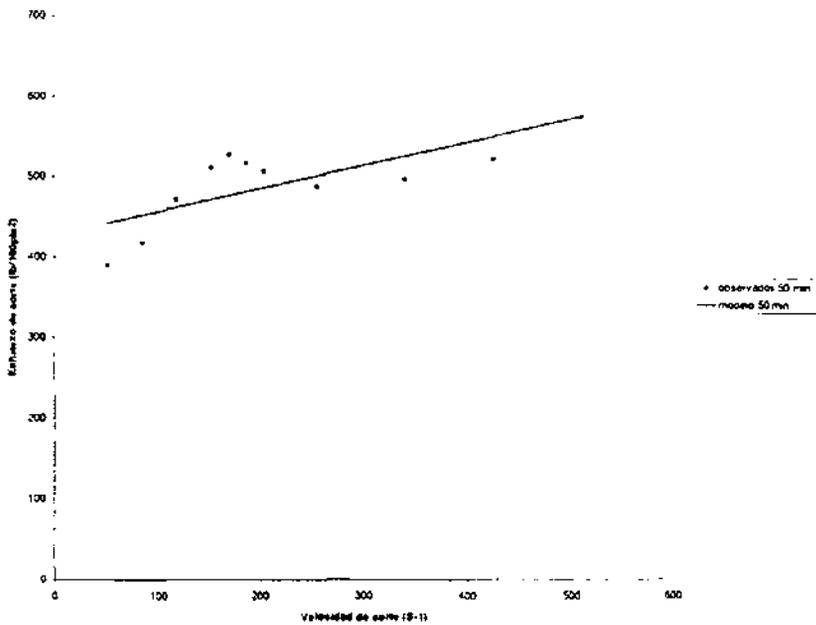


Figura D4 Esfuerzo contra la velocidad de corte del modelo operativo para un tiempo de 50 min.

La comparación entre el modelo Plástico de Bingham y Ley de potencias, se presenta a continuación.

TIEMPO (min.)	ERROR DEL MODELO(%)	
	LEY DE POTENCIAS	PLASTICO DE BINGHAM
10	4.54	2.91
20	68.45	14.13
30	1.33	0.75
40	65.67	14.17
50	4.95	6.01
ERROR PROMEDIO	29.18	7.59
PREDICCIÓN PROMEDIO	70.82	92.4

Tabla D1 Comparación predictiva entre el modelo Ley de potencias y Plástico de Bingham

La corrida numérica del software SSPS es mostrada a continuación, en la cual se presentan los valores del análisis de varianza (estadísticos de Fisher) y el valor de cada coeficiente del modelo en función del tiempo:

Curve Fit

MODEL: MOD_3.

Dependent variable.. VAR00001 Method.. CUBIC

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R .99875
R Square .99750
Adjusted R Square .99000
Standard Error .00695

Analysis of Variance:

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	.01925611	.00641870

Residuals 1 .00004824 .00004824

F = 133.04967 Signif F = .0636

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
VAR00003	.013205	.004466	3.005483	2.957	.2076
VAR00003**2	-2.39578571E-05	.000166	-.333469	-.145	.9086
VAR00003**3	-2.99766667E-06	1.8304E-06	-2.199193	-1.638	.3490
(Constant)	.061834	.034168		1.810	.3214

Dependent variable.. VAR00002 Method.. CUJIC

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R .99070
 R Square .98148
 Adjusted R Square .92592
 Standard Error 37.79935

Analysis of Variance:

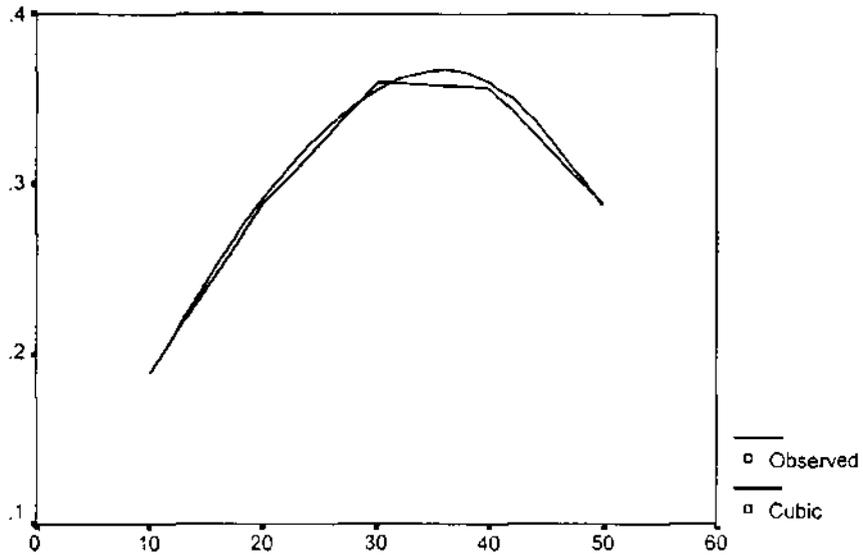
	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	75717.534	25239.178
Residuals	1	1428.791	1428.791

F = 17.66471 Signif F = .1727

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
VAR00003	-.786058	24.306250	-.089495	-.032	.9794
VAR00003**2	-.332079	.902164	-2.312170	-.368	.7755
VAR00003**3	.008969	.009961	3.291409	.900	.5333
(Constant)	175.389856	185.948232		.943	.5186

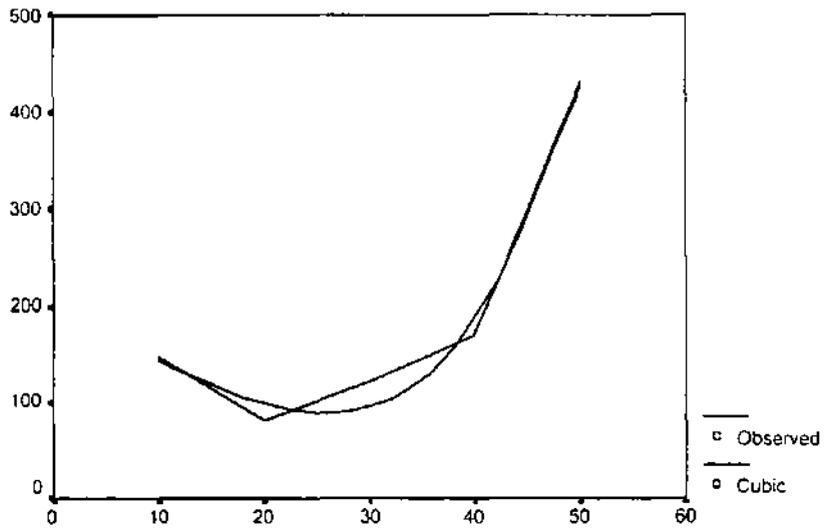
VAR00001



VAR00003

Figura D5 Ajuste del coeficiente alfa.

VAR00002



VAR00003

Figura D6 Ajuste del coeficiente beta.

Modelo generalizado en función del tiempo

Las figuras complementarias de los tiempos restantes del modelo generalizado se muestran a continuación:

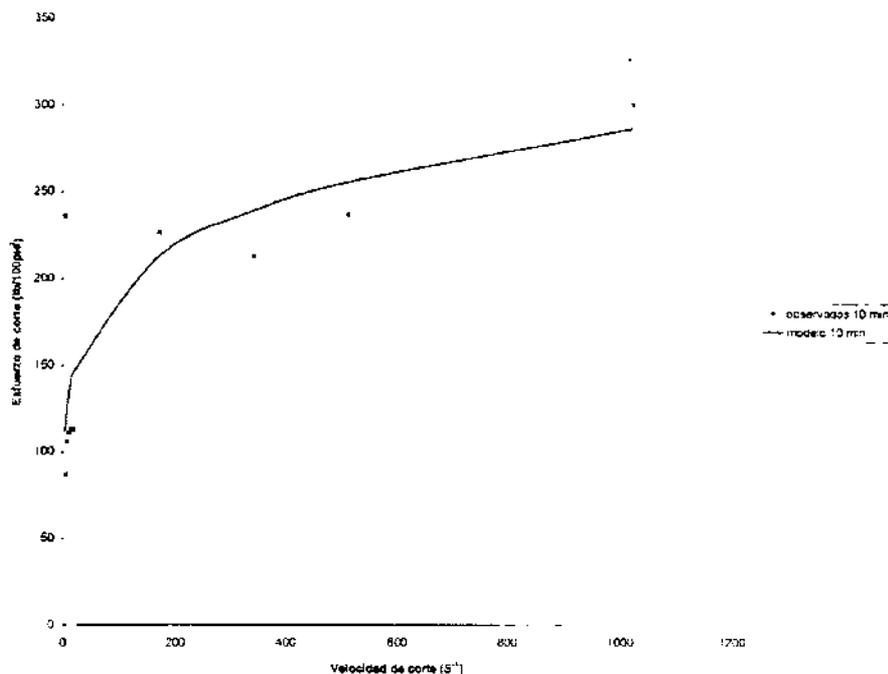


Figura D7 Esfuerzo contra la velocidad de corte del modelo generalizado para un tiempo de 10 min.

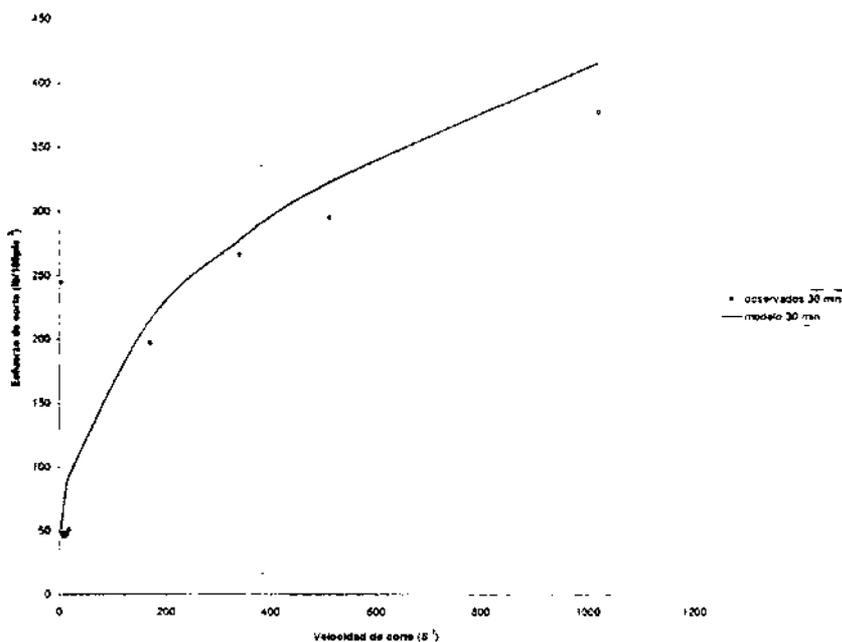


Figura D8 Esfuerzo contra la velocidad de corte del modelo generalizado para un tiempo de 30 min.

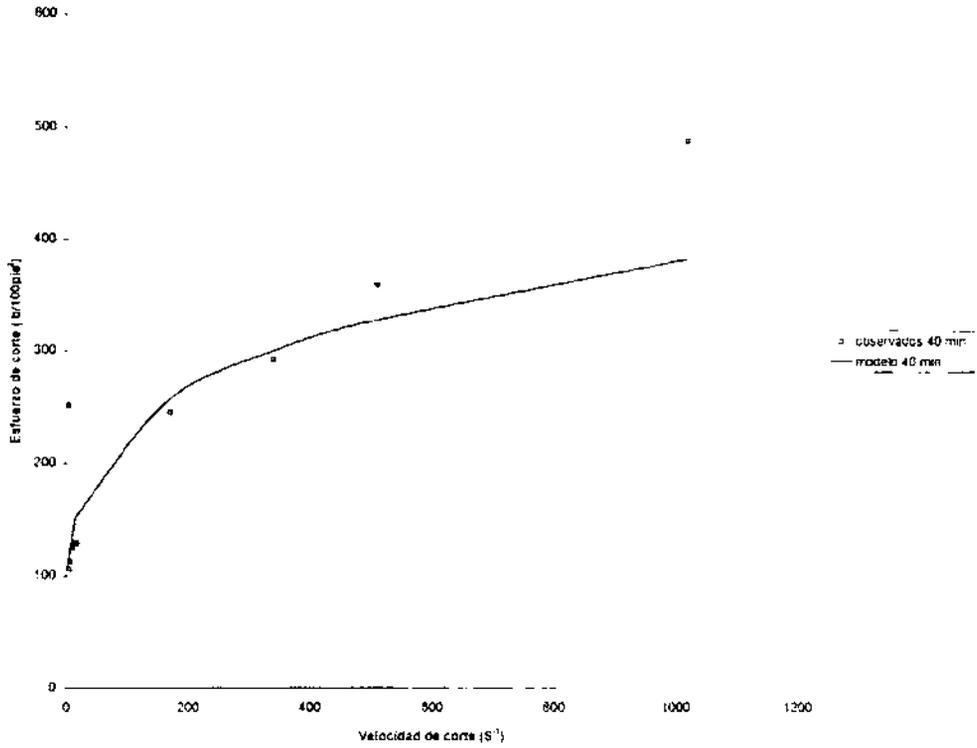


Figura D9 Esfuerzo contra la velocidad de corte del modelo generalizado para un tiempo de 40 min.

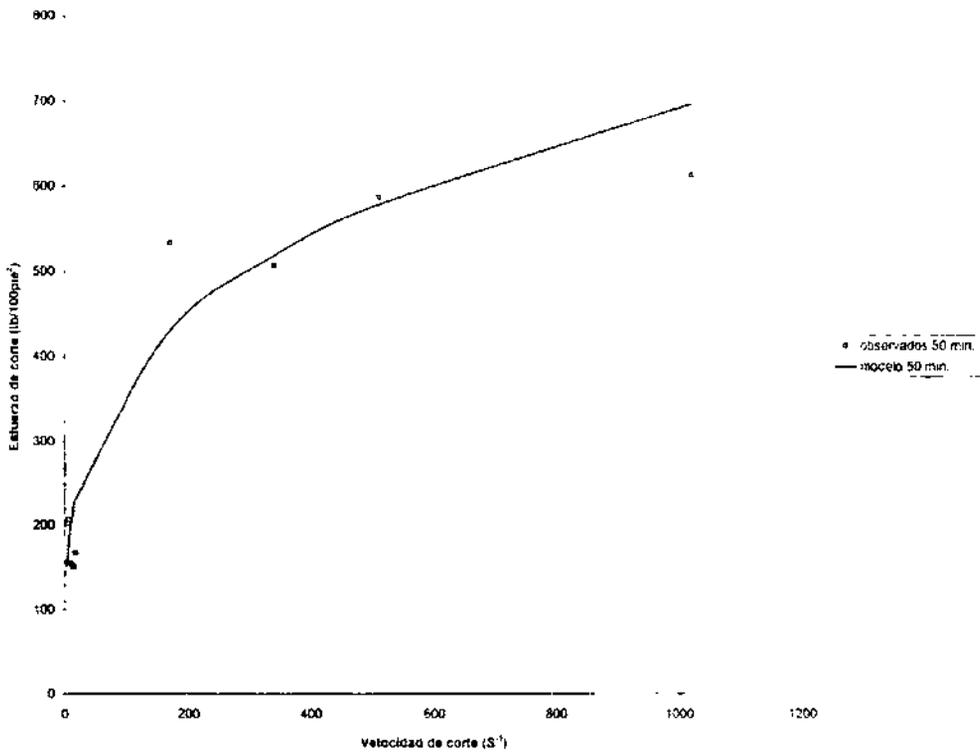


Figura D10 Esfuerzo contra la velocidad de corte del modelo generalizado para un tiempo de 50 min.

La corrida numérica del software SSPS es mostrada a continuación, en la cual se presentan los valores del análisis de varianza (estadísticos de Fisher) y el valor de cada coeficiente del modelo en función del tiempo:

Curve Fit

MODEL: MOD_2.

—

Dependent variable.. VAR00001 Method.. CUBIC

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R .99558
 R Square .99117
 Adjusted R Square .96469
 Standard Error 7.42985

Analysis of Variance:

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	6197.6428	2065.8809
Residuals	1	55.2026	55.2026

F = 37.42361 Signif F = .1195

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
VAR00003	-31.243177	4.777640	-12.494427	-6.539	.0966
VAR00003**2	1.012713	.177330	24.767572	5.711	.1104
VAR00003**3	-.009385	.001958	-12.098172	-4.793	.1309
(Constant)	311.653860	36.550009		8.527	.0743

—

Dependent variable.. VAR00002 Method.. CUBIC

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R .97183
 R Square .94445
 Adjusted R Square .77781
 Standard Error .05330

Analysis of Variance:

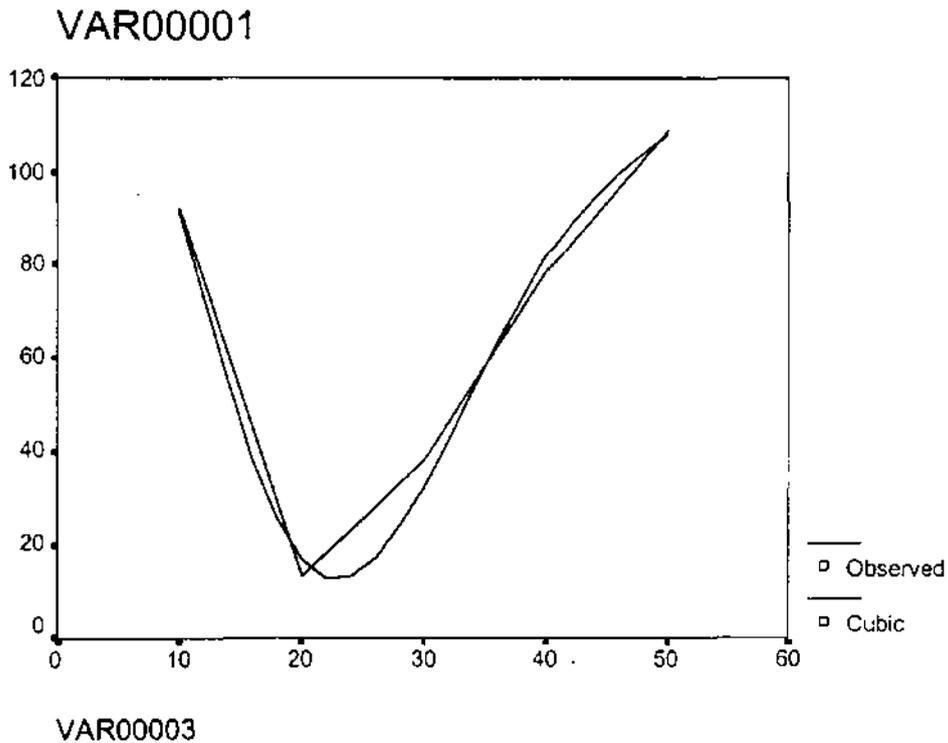
DF	Sum of Squares	Mean Square
----	----------------	-------------

Regression 3 .04830363 .01610121
 Residuals 1 .00284094 .00234094

F = 5.66756 Signif F = .2973

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
VAR00003	.127240	.034274	17.792004	3.712	.1675
VAR00003**2	-.004369	.001272	-37.360646	-3.434	.1804
VAR00003**3	4.43468333E-05	1.4046E-05	19.988058	3.157	.1953
(Constant)	-.714209	.262204		-2.724	.2240



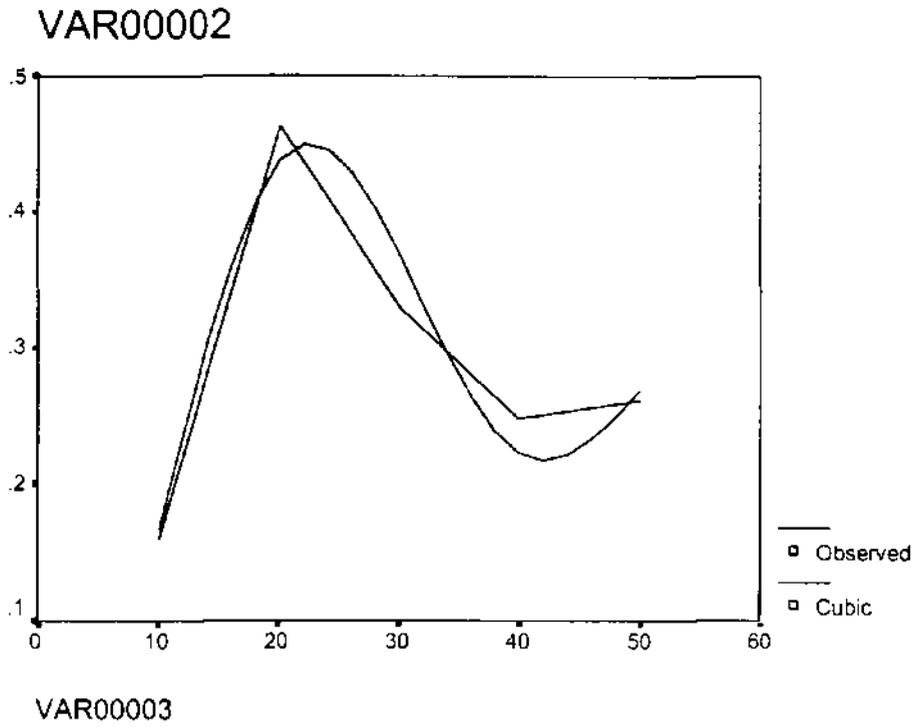


Figura D12 Ajuste del coeficiente beta.