

19 01174



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO  
REOLÓGICO DE LAS LECHADAS DE  
CEMENTO A ALTA PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL  
TIEMPO PARA MEJORAR LA CEMENTACIÓN  
DE LAS TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO”

T E S I S

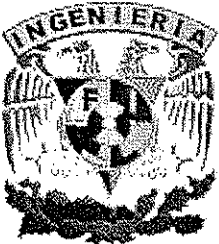
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA PETROLERA  
(ESPECIALIDAD EN PERFORACIÓN)

PRESENTA

ING. FERNANDO TORRES RODRÍGUEZ

ASESOR: M. EN C. IGNACIO CORTES MONROY

DIRECTOR: ING. EUSEBIO CAPITANACHI GONZALEZ



CD. UNIVERSITARIA MÉXICO D.F.

SEPTIEMBRE DEL 2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**FALTA  
PAGINA**

**ii**

## R E S U M E N

Este trabajo presenta un análisis del comportamiento reológico de las lechadas de cemento y su dependencia con la presión a la temperatura promedio encontrada en los pozos petroleros de la Región Sur. Para lo cual se realizaron dos tipos de pruebas experimentales, las pruebas de consistencia contra tiempo de espesamiento mediante un consistómetro de alta presión y temperatura a diferentes concentraciones de retardador. Además se realizaron pruebas reológicas de las lechadas de cemento en un viscosímetro de alta presión y temperatura. El comportamiento reológico de las lechadas de cemento es complejo y los modelos reológicos no consideran en su caracterización la dependencia con el tiempo aún cuando se reconoce que en la reacción química de hidratación, la temperatura tiene un efecto predominante, para el caso de la presión los modelos usados en los cálculos de ingeniería descartan a éstas como variables que puedan afectar las propiedades reológicas de las lechadas.

El presente estudio demuestra que estas dos variables tienen una gran importancia en la naturaleza reactiva de la lechada cementante cuya estructura molecular y propiedades reológicas se modifican debido a la reacción de hidratación, la cual está gobernada por la temperatura y la presión, estas contribuyen a la generación de macromoléculas reactivas que se aglutinan en un gel, el cual se transforma de líquido a sólido a través de un proceso de formación de estructuras que une los diferentes componentes minerales del cemento mediante ligas de arcilla y consolida su estructura incrementando su viscosidad como parte del proceso de espesamiento de la lechada a pesar de los aditivos retardadores.

Esto origina una variación de la reología que está ligada al tiempo y las reacciones químicas que se efectúan en las lechadas de cemento. El trabajo desarrollado propone un modelo reológico en función del tiempo a condiciones de alta presión y alta temperatura para el comportamiento de las lechadas de cemento a diferentes velocidades de corte, aplicable en los pozos de la Región Sur para la optimización del proceso de cementación de las tuberías de revestimiento ya que hasta el momento, no existen modelos reológicos en función del tiempo para pozos de alta presión y alta temperatura.

**AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS**

A mi esposa Silvia a quien agradezco su ayuda incalculable en mis noches de desvelo y a quien amo con todo mi corazón.

A dos personas muy especiales para mi, mis hijos Cinhtya Paola y Cristian Fernando que me apoyaron y fueron siempre la inspiración para continuar en la conclusión de este trabajo.

A mis maestros que me brindaron la oportunidad de compartir sus conocimientos y que fueron la guía en esta gran empresa.

A mis padres a quien amo profundamente estén donde estén.

A mis sinodales que aportaron su valiosa participaciones dentro de este trabajo

Muy especialmente al M. en C. Ignacio R. Cortés Monroy quien fue mi asesor y al Ing. Eusebio Capitanachi González quien fue mi director de tesis.

Al Dr. Daniel García Gavito quien fue mi coordinador y al que considero un gran amigo.

A todos mis hermanos que siempre me dieron cariño y un buen ejemplo a quienes amo para toda la vida

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A todos mis amigos y compañeros de trabajo con quien comparto mi vida cotidiana.

A todos mis amigos personales quienes siempre se preocuparon por mi y me extendieron un espíritu de esperanza y amistad.

A la vida que me ha permitido llegar hasta este momento y disfrutarlo.

A mis sinodales que aportaron su valiosa participaciones dentro de este trabajo

Al Dr. Vicente Cazariego a quien admiro y agradezco su interés y su participación en este trabajo:

A tantas personas que la ingratitud de la memoria no me permite recordar en estos momentos de emoción valla todo mi agradecimiento.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Ing. Fernando Torres

Rodríguez

FECHA: 9/SEP/2002

FIRMA: [Firma]

**C O N T E N I D O**

	Pagina
<b>PORTADA</b>	i
<b>OFICIO DE ACEPTACIÓN</b>	ii
<b>RESUMEN</b>	iii
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	iv
<b>CONTENIDO</b>	vi
<b>LISTA DE TABLAS</b>	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	xii
<b>CAPITULO 1. Introducción.</b>	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Problemática de las Cementaciones Región Sur	3
1.3 Factores que Contribuyen a las Fallas en las Cementaciones	9
1.4. Cementación de las Tuberías de Revestimiento	11
1.4.1 Tubería Conductora	11
1.4.2 Tubería Superficial	11
1.4.3 Tubería Intermedia	12
1.4.4 Tubería de Explotación	13
<b>CAPITULO 2. Conceptos Básicos.</b>	16
2.1 Clasificación de Cementos	18
2.2 Cementos Especiales	19
2.3 Pruebas del Cemento	20
2.3.1 Consistómetro de Cemento	20
2.3.2 Viscosímetro Fann 70	22
<b>CAPITULO 3. Composición Química del Cemento.</b>	24
3.1 Análisis de Oxidos	27
3.2 Hidratación de las fases de los silicatos	28
3.2.1 Periodo de Preinducción I	29
3.2.2 Periodo de Inducción II	29
3.2.3 Periodo de Aceleración III y Desaceleración IV	30
3.2.4 Periodo de Difusión V	30
3.3 Hidratación de las fases de aluminatos	31
3.4 Hidratación del sistema multicomponente de los cementos	32

	Pagina
<b>CAPITULO 4. Aditivos para la Cementación.</b>	34
4.1 Modificaciones a las propiedades del cemento con el uso de aditivos	34
4.2 Clasificación de los Aditivos	35
4.3 Aceleradores	35
4.4 Retardadores	40
4.4.1 Mecanismos de acción de los retardadores	46
<b>CAPITULO 5. Reología de las lechadas de cemento</b>	49
5.1 Definiciones reológicas	50
5.2 Clasificación de los fluidos	53
5.3 Modelos reológicos independientes del tiempo	54
5.4 Comportamiento reológico dependiente del tiempo	59
<b>CAPITULO 6. Pruebas de consistencia y espesamiento de las lechadas</b>	62
6.1 Consideraciones de presión y temperatura	62
6.2 Desarrollo de las pruebas de consistencia y tiempo de espesamiento	64
6.3 Resultados experimentales de las pruebas de consistencia	68
6.4 Análisis de los resultados de las pruebas de consistencia	78
<b>CAPITULO 7. Pruebas reológicas de las lechadas de cemento</b>	86
7.1 Consideraciones de presión y temperatura	87
7.2 Desarrollo de las pruebas reológicas	93
7.3 Resultados experimentales de las pruebas reológicas	97
7.4 Análisis de los resultados de las pruebas reológicas	104
<b>CAPITULO 8. Ajuste del modelo reológico</b>	110
8.1 Análisis estadístico para el ajuste del modelo reológico	112
8.2 Obtención de los coeficientes $\alpha(t)$ y $\beta(t)$ para el primer nivel de presión	114
8.3 Obtención de los coeficientes $\alpha(t)$ y $\beta(t)$ para el segundo nivel de presión	116
8.4 Obtención de los coeficientes $\alpha(t)$ y $\beta(t)$ para el tercer nivel de presión	118
8.5 Análisis dimensional del modelo reológico en función del tiempo	123
<b>CONCLUSIONES</b>	125
<b>RECOMENDACIONES</b>	126
<b>NOMENCLATURA</b>	127
<b>REFERENCIAS</b>	128
<b>ANEXOS</b>	
ANEXO "A" Problema de aplicación Pozo Jujo 18 Región Sur.	130
ANEXO "B" Curvas reológicas de las pruebas y el modelo	144
ANEXO "C" Fundamento teórico del software	152



## LISTA DE TABLAS

TABLA	D E S C R I P C I Ó N	PAGINA
1-1	Información sobre la geometría de un pozo típico de la Región Sur	7
1-2	Tendencia de la profundidad en los pozos de la Región Sur	9
2-1	Clasificación API de los cementos de acuerdo a la norma 10-A del API	18
3-1	Fórmulas y designaciones estándar de los componentes del cemento Portland.	24
3-2	Composición típica y propiedades de los cementos Portland API clases G y H	26
3-3	Análisis de óxidos típicos de cemento Portland	27
3-4	Propiedades de los cementos API clases G y H	27
4-1	Aditivos aceleradores de cemento	36
4-2	Efecto del cloruro de calcio sobre el tiempo de espesamiento y la resistencia a la compresión del cemento	36
4-3	Efecto del cloruro de sodio sobre el tiempo de espesamiento y la resistencia a la compresión de los cementos	37
4-4	Propiedades de las composiciones de yeso y yeso cemento	38
4-5	Efectos del silicato de sodio sobre el tiempo de espesamiento y la resistencia a la compresión de las lechadas de cemento	38
4-6	Efecto de la densificación sobre el tiempo de espesamiento de cementos	39
4-7	Análisis del agua de mar	39
4-8	Efectos del agua de mar y agua dulce sobre el tiempo de espesamiento y resistencia a la compresión de lechadas de cementos	40
4-9	Retardadores	40
4-10	Efecto retardador del lignosulfonato de calcio sobre las lechadas de cemento	41
4-11	Cantidad recomendada y tiempo de espesamiento del retardador lignosulfonato de calcio para cementos	41
4-12	Resumen de los aditivos y los mecanismos de acción	48
5-1	Clasificación de fluidos	53
5-2	Ejemplos de diferentes tipos de fluidos	54

TABLA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
6-1	Cédulas 31 y 5 de las especificaciones 10-A del API de cementos y materiales para la cementación de pozos, a una profundidad de 5490 y 2500 m	64
6-2	Efecto de un lignosulfonato sobre el tiempo máximo de espesamiento de una lechada de cemento a 136°C y 18,800 lb/pg <sup>2</sup>	65
6-3	Clasificación de retardadores químicos que extienden el tiempo bombeable y el tiempo de espesamiento de las lechadas de cemento	66
6-4	Prueba No. 1 consistencia de una lechada de cemento, temperatura máxima de 53°C y presión máxima de 6,000 lb/pg <sup>2</sup> , tiempo máximo de espesamiento de 104 minutos	68
6-5	Prueba No. 2 consistencia de una lechada de cemento a una temperatura máxima de 111°C y una presión máxima de 15,000 lb/pg <sup>2</sup> , tiempo máximo de espesamiento de 30 minutos	69
6-6	Prueba No. 3 consistencia de una lechada de cemento a una temperatura máxima de 138°C y una presión máxima de 19,500 lb/pg <sup>2</sup> , tiempo máximo de espesamiento 67.5 minutos	70
6-7	Prueba No. 4 consistencia de una lechada de cemento con 2 g de retardador, temperatura máxima de 138°C y presión máxima de 12,300 lb/pg <sup>2</sup> , tiempo máximo de espesamiento 71 minutos	71
6-8	Prueba No. 5 consistencia de una lechada de cemento con 2 g de retardador, temperatura máxima de 137°C y presión máxima de 6,300 lb/pg <sup>2</sup> , tiempo máximo de espesamiento 159 minutos	72
6-9	Prueba No. 6 consistencia de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a una temperatura máxima de 137°C y una presión máxima de 21,200 lb/pg <sup>2</sup> , tiempo máximo de espesamiento 156 minutos	73
6-10	Prueba No. 7 consistencia de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador temperatura máxima de 137°C y presión máxima de 12,300 lb/pg <sup>2</sup> , tiempo máximo de espesamiento de 194 minutos	75
6-11	Prueba No. 8 consistencia de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador, temperatura máxima de 137°C y presión máxima de 6,000 lb/pg <sup>2</sup> , tiempo máximo de espesamiento 255 minutos	77

TABLA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
6-12	Resumen de pruebas con el consistómetro a las lechadas de cemento	78
7-1	Reología de una lechada de cemento con la cédula 5 API en función del tiempo, sin retardador, a condiciones de $T_{\max}=52^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=5,200\text{ lb/pg}^2$	93
7-2	Reología de una lechada de cemento en función del tiempo, 4.5 g de retardador, a condiciones de $T_{\max}=138^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=6,200\text{ lb/pg}^2$	94
7-3	Reología de una lechada de cemento en función del tiempo, 4.5 g de retardador, a condiciones de $T_{\max}=136^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=12,000\text{ lb/pg}^2$	95
7-4	Reología de una lechada de cemento en función del tiempo, 4.5 g de retardador, a condiciones de $T_{\max}=136^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=18,800\text{ lb/pg}^2$	96
8-1	Reología de una lechada de cemento, en función del tiempo para el primer nivel de presión $6,200\text{ lb/pg}^2$ y una temperatura de $138^{\circ}\text{C}$	113
8-2	Resultado de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ obtenidos por regresión cúbica para el primer nivel de presión $6,200\text{ lb/pg}^2$ .	114
8-3	Reología de una lechada de cemento, en función del tiempo a condiciones de $136^{\circ}\text{C}$ para el segundo nivel de presión de $12,000\text{ lb/pg}^2$	116
8-4	Resultado de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ obtenidos por regresión cúbica para el segundo nivel de presión $12,000\text{ lb/pg}^2$ y una temperatura de $136^{\circ}\text{C}$	117
8-5	Reología de una lechada de cemento, con la cédula 31 API en función del tiempo para el tercer nivel de presión de $18,800\text{ lb/pg}^2$ a una temperatura de $136^{\circ}\text{C}$	118

TABLA	D E S C R I P C I Ó N	PAGINA
8-6	Resultado de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ obtenidos por regresión cúbica de las pruebas reológicas para el tercer nivel de presión 18,800 lb/pg <sup>2</sup> y una temperatura de 136°C	119
8-7	Coefficientes de regresión $\alpha$ y $\beta$ para los tres niveles de presión del modelo	120
8-8	Criterio de aceptación de las hipótesis $H_0$ y $H_1$ para los tres niveles de presión	121
8-9	Determinación de unidades y dimensiones del modelo reológico en función del tiempo	124

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
1-1	Campos productores de hidrocarburos de PEP, Región Sur	4
1-2	Sección estructural tipo campos Caparroso-Pijije-Escuintle	6
1-3	Sección estructural tipo campos Luna-Palapa, en yacimientos del Cretácico y Jurásico	6
1-4	Sección estructural tipo del Campo Chinchorro en los contactos Yagual a Chinchorro.	7
1-5	Arreglo típico de las tuberías de revestimiento de la Región Sur	8
2-1	Consistómetro de alta presión y temperatura	21
2-2	Viscosímetro Fann 70 para altas presiones y temperaturas	22
3-1	Vista de una sección microscópica del clíncker de un cemento Portland	24
3-2	Fotografía de un precipitado de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en una matriz de gel C-S-H	28
3-3	Representación esquemática de los cambios en el sistema agua silicato tricálcico $\text{C}_3\text{S}$	29
3-4	Fotografía de cristales de Ettringita	31
3-5	Termograma de hidratación del aluminato tricálcico $\text{C}_3\text{A}$ con yeso ( $25^\circ\text{C}$ )	32
3-6	Representación esquemática de la hidratación del cemento Portland	33
4-1	Estructura química básica de un lignosulfonato	42
5-1	Diagrama de clasificación de sustancias puras y mezclas de la materia	53
5-2	Resumen de los modelos reológicos independientes del tiempo	59
6-1	Prueba No. 1 Gráfica de consistencia-tiempo de espesamiento de una lechada de cemento, cédula 5, $T_{\text{max}}= 53^\circ\text{C}$ y $P_{\text{max}}= 6,000 \text{ lb/pg}^2$ , tiempo máximo de espesamiento 103 minutos	80
6-2	Prueba No. 2 Gráfica de consistencia-tiempo de espesamiento de una lechada de cemento, cédula 31 $T_{\text{max}}= 111^\circ\text{C}$ y $P_{\text{max}}= 15,000 \text{ lb/pg}^2$ , tiempo máximo de espesamiento 30 minutos	80
6-3	Pruebas 1 y 2 Gráfica comparativa de consistencia-tiempo de espesamiento de las lechadas de cemento, a alta y baja presión y temperatura	81

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
6-4	Pruebas 3,4 y 5 Gráfica de consistencia-tiempo de espesamiento a diferentes niveles de presión $P_{max}=19,500$ , $P_{max}= 12,300$ , y $P_{max}= 6,300$ lb/pg <sup>2</sup> , temperatura de 136°C, concentración de retardador de 0.23%, tiempos máximos de espesamiento 67.5, 71 y 159 minutos	81
6-5	Pruebas 6,7 y 8 Gráfica de consistencia-tiempo de espesamiento a diferentes niveles de presión, $P_{max}=21,200$ , $P_{max}= 12300$ , y $P_{max}= 6,000$ lb/pg <sup>2</sup> , temperatura de 136°C, concentración de retardador de 0.52%, tiempos máximos de espesamiento 156, 194, y 255 minutos	82
6-6	Pruebas 1,2,3,4,5,6,7 y 8 Gráfica comparativa de consistencia-tiempo de espesamiento a diferentes concentraciones de retardador de (0.0, 0.23, 0.46, 0.52, 0.58 y 0.69%), tiempos máximos de espesamiento 104, 30, 67.5, 71, 159, 156, 194 y 255 minutos	83
7-1	Comportamiento de la temperatura en una lechada de cemento sin retardador $T_{max}=52^{\circ}C$ y $P_{max}=5,200$ lb/pg <sup>2</sup>	89
7-2	Comportamiento de la presión en una lechada de cemento sin retardador $T_{max}=52^{\circ}C$ y $P_{max}=5,200$ lb/pg <sup>2</sup>	89
7-3	Comportamiento de la temperatura en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador $T_{max}=136^{\circ}C$ y $P_{max}=6,200$ lb/pg <sup>2</sup>	90
7-4	Comportamiento de la presión en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador $T_{max}=138^{\circ}C$ y $P_{max}=6,200$ lb/pg <sup>2</sup>	90
7-5	Comportamiento de la temperatura en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador $T_{max}=136^{\circ}C$ y $P_{max}=12,000$ lb/pg <sup>2</sup>	91
7-6	Comportamiento de la presión en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador $T_{max}=136^{\circ}C$ y $P_{max}=12,000$ lb/pg <sup>2</sup>	91
7-7	Comportamiento de la temperatura en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador $T_{max}=136^{\circ}C$ y $P_{max}=18,800$ lb/pg <sup>2</sup>	92
7-8	Comportamiento de la presión en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador $T_{max}=136^{\circ}C$ y $P_{max}=18800$ lb/pg <sup>2</sup>	92

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
7-9	Comportamiento de la reología de 0 a 35 minutos en una lechada de cemento sin retardador a $T_{\max}=52^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=5,200 \text{ lb/pg}^2$	98
7-10	Comportamiento de la reología de 40 a 50 minutos en una lechada de cemento sin retardador a $T_{\max}=52^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=5,200 \text{ lb/pg}^2$	98
7-11	Comportamiento de la reología de 55 a 65 minutos en una lechada de cemento sin retardador a $T_{\max}=52^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=5,200 \text{ lb/pg}^2$	99
7-12	Comportamiento de la reología de 5 a 25 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a $T_{\max}=138^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=6,200 \text{ lb/pg}^2$	99
7-13	Comportamiento de la reología de 30 a 40 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a $T_{\max}=138^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=6,200 \text{ lb/pg}^2$	100
7-14	Comportamiento de la reología de 45 a 55 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a $T_{\max}=138^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=6,200 \text{ lb/pg}^2$	100
7-15	Comportamiento de la reología de 60 a 70 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a $T_{\max}=138^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=6,200 \text{ lb/pg}^2$	101
7-16	Comportamiento de la reología de 5 a 30 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a $T_{\max}=136^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=12,000 \text{ lb/pg}^2$	101
7-17	Comportamiento de la reología de 40 a 60 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a $T_{\max}=136^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=12,000 \text{ lb/pg}^2$	102
7-18	Comportamiento de la reología de 5 a 20 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a $T_{\max}=136^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=18,800 \text{ lb/pg}^2$	102
7-19	Comportamiento de la reología de 25 a 45 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a $T_{\max}=136^{\circ}\text{C}$ y $P_{\max}=18,800 \text{ lb/pg}^2$	103

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
7-20	Comportamiento de la reología de 50 a 70 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a $T_{max}=136^{\circ}C$ y $P_{max}=18,800$ lb/pg <sup>2</sup>	103
7-21	Comportamiento de la reología de 75 a 100 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a $T_{max}=136^{\circ}C$ y $P_{max}=18,800$ lb/pg <sup>2</sup>	104
7-22	Prueba No. 1 Comportamiento de la reología de una lechada de cemento cédula No. 5, sin retardador en función del tiempo de 5 a 65 minutos a $T_{max}=52^{\circ}C$ y $P_{max}=5200$ lb/pg <sup>2</sup> .	106
7-23	Prueba No. 2 Comportamiento de la reología de una lechada de cemento, con 4.5 g de retardador en función del tiempo de 5 a 70 minutos a $T_{max}=138^{\circ}C$ y $P_{max}=6200$ lb/pg <sup>2</sup>	107
7-24	Prueba No. 3 Comportamiento de la reología de una lechada de cemento, con 4.5 g de retardador en función del tiempo de 5 a 60 minutos a $T_{max}=136^{\circ}C$ y $P_{max}=12,000$ lb/pg <sup>2</sup>	108
7-25	Prueba No. 4 Comportamiento de la reología de una lechada de cemento, con 4.5 g de retardador, cedula 31 en función del tiempo de 5 a 100 minutos a $T_{max}=136^{\circ}C$ y $P_{max}=18,800$ lb/pg <sup>2</sup>	109
8-1	Ajuste del modelo reológico para el tercer nivel de presión 18,800 lb/pg <sup>2</sup> y temperatura 136°C para un tiempo de 100 minutos	122

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los trabajos reportados por la literatura técnica sobre cementaciones que fueron consultados para realizar este trabajo y que se presentan en las referencias, se ha considerado que el comportamiento de las lechadas de cemento es similar al de un fluido de perforación, pero no se considera la variación dinámica de sus propiedades reológicas con respecto al tiempo, la presión y la temperatura. Sin embargo en la realidad existe una variación de estas propiedades, que modifica el comportamiento reológico de las lechadas y por consecuencia el flujo durante la cementación de las tuberías de revestimiento en los pozos petroleros. El conocimiento y estudio del comportamiento reológico, puede ayudar a mejorar las operaciones de cementación de las tuberías de revestimiento. Este trabajo de tesis se apoya en pruebas experimentales a nivel laboratorio realizadas con un consistómetro marca Chandler Modelo 8-25 y un viscosímetro Fann 70 de alta presión y temperatura para tratar de analizar el comportamiento de las lechadas de cemento, cuando se someten a presión y temperatura. Las primeras permitieron observar el comportamiento de la consistencia de las lechadas de cemento en función del tiempo de espesamiento y las segundas determinar el comportamiento reológico de las lechadas de cemento a las condiciones de presión y temperatura encontradas en pozos de la Región Sur. Durante el proceso de hidratación las lechadas de cemento se ven sometidas a fuerzas intermoleculares que construyen la estructura de una gel que se forma durante la reacción de hidratación y liga los cristales de cemento con los sólidos que se precipitan durante ésta, formando una gel compleja que se transforma en función del tiempo y sufre una metamorfosis originando un comportamiento retrógrado que hace variar las propiedades reológicas, esto se observa por el aumento de los esfuerzos de corte que incrementan la viscosidad lo que se ve favorecido por las altas presiones que a su vez originan el fenómeno de cristalización de las moléculas, formando estructuras que aceleran el espesamiento de la lechada de cemento hasta llegar a un tiempo máximo en que la lechada no se puede bombear más ya que a

partir de ese tiempo ocurre la solidificación instantánea de la lechada. Para explicar lo que ocurre en este proceso, la tesis incluye un capítulo sobre la química del cemento y otro sobre aditivos. Las pruebas con el viscosímetro Fann 70 permiten observar la relación que se presenta entre el esfuerzo y velocidad de deformación en función del tiempo a las condiciones de presión y temperatura encontradas en pozos de la Región Sur.

### 1.1. OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es analizar el comportamiento de las lechadas de cemento y obtener un modelo reológico en función del tiempo que permita reproducir el comportamiento de las lechadas de cemento y considere las condiciones de presión y temperatura que se presentan en las operaciones de cementación de las tuberías de revestimiento de 7" y 5" para los pozos de la Región Sur de Petróleos Mexicanos.

### 1.2. PROBLEMÁTICA DE LAS CEMENTACIONES REGIÓN SUR<sup>1</sup>.

La Región Sur es el ámbito geográfico que corresponde a la división administrativa de PEMEX - Exploración y Producción (PEP) que a partir de 1995 coordina las actividades de exploración, desarrollo de campos, producción de crudo y gas natural en el territorio nacional. Esta constituida por 103 campos con diferentes formaciones productoras (40 del terciario y 63 del mesozoico) distribuidos en cinco Distritos: Agua Dulce, Cárdenas, Comalcalco, Reforma y Ocosingo. Los distritos están administrados por 7 activos de producción, 3 activos de exploración y 6 bases de perforación, que controlan las siguientes áreas de yacimientos:

1. Bellota-Chinchorro
2. Chilapilla-José Colomo
3. Cinco Presidentes
4. Jujo-Tecominoacan
5. Luna
6. Muspac
7. Reforma-Comalcalco
8. Samaria-Sitio Grande
9. Agua Dulce
10. Ciudad Pemex



Los campos productores de hidrocarburos de PEP en la Región Sur se muestran en la Figura 1-1.

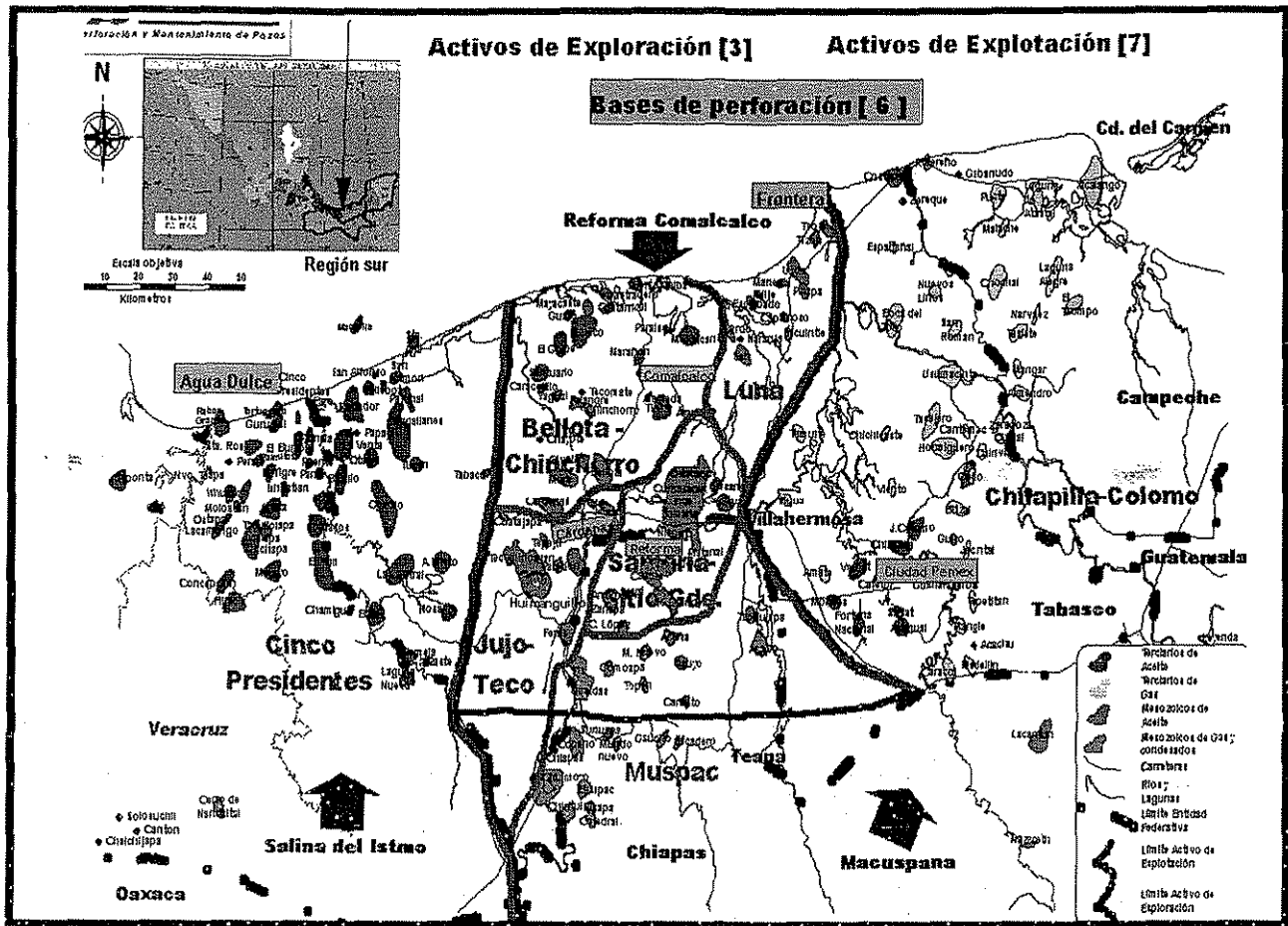


Figura 1-1 Campos productores de hidrocarburos de PEP, Región Sur.

Su producción de aceite y gas contribuye con el 22% y 49% respectivamente a la producción nacional. Hasta 1970 la productividad se concentraba en las formaciones del Terciario alcanzando en promedio producciones de 125 barriles/día/pozo provenientes de areniscas que se acuñan contra altos diapiros de sal, la profundidad promedio de los pozos del terciario no rebasa los 3200 m. De 1970 a 1980 el objetivo principal se concentró en las formaciones del Mesozoico que se encuentran bajo los campos del Terciario, en una secuencia de sabanas salinas que forman la roca sello y alojan las formaciones productoras, carbonatadas del Mesozoico y del Cretácico Superior, Medio e Inferior en esta formación la profundidad promedio de los pozos es de 3700 m y a partir de 1995 se han estudiado otras formaciones más profundas que

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

han permitido generar nuevos descubrimientos con localizaciones productoras de hidrocarburos ligeros en las brechas del Jurásico Superior Thitoniano y Kimmeridgiano con pozos que llegan a alcanzar de los 5500 a 5800 m de profundidad donde se encuentran formaciones productoras de aceite volátil en rocas dolomitizadas, pero todo indica que se seguirá profundizando hasta alcanzar el Jurásico Oxfordiano, como lo indica la tabla 1-2 que muestra la tendencia de la profundidad en los pozos de la Región Sur.

A mayores profundidades los efectos más importantes sobre los fluidos de perforación y las lechadas de cemento los determinan las altas presiones y temperaturas, las cuales están implícitas en los geogradientes de presión y temperatura que son característicos de cada yacimiento. La cementación de las tuberías en la formación productora, debe considerar como base para su diseño las presiones de formación, fractura y sobrecarga, así como la temperatura para cada pozo en particular. Existen tres alternativas para la obtención de esta información los registros sísmicos, los registros geofísicos y los expedientes de perforación. Cuando no hay disponibilidad de los datos específicos de pozos vecinos como en el caso de los pozos exploratorios, se puede tomar como alternativa los datos de por lo menos 3 pozos cercanos, de los cuales se disponga de las curvas de gradientes de presión de formación, fractura y su correspondiente registro de temperatura, así como de las evidencias de los problemas que se tengan en el transcurso de la perforación, para programar el asentamiento de las tuberías de revestimiento y su cementación.

En las Figuras 1-2 a 1-4 se presentan las secciones estructurales de algunos de los campos productores de hidrocarburos de PEP en la Región Sur, en donde se puede observar las profundidades alcanzadas por los pozos.

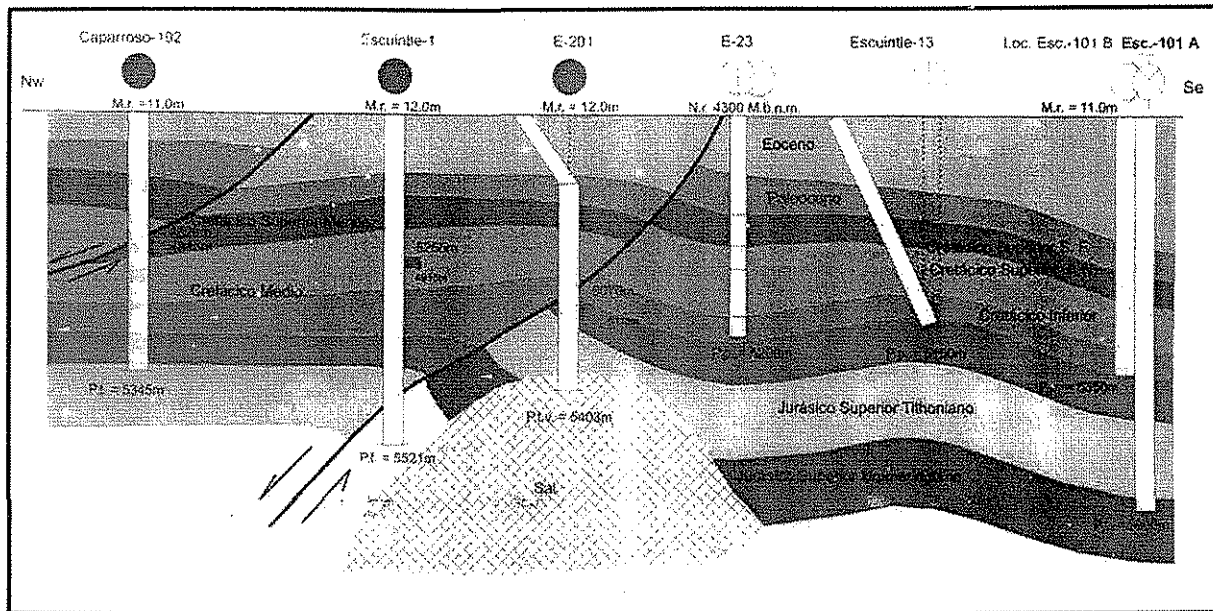


Figura 1-2 Sección estructural tipo de los Campos Caparroso-Pijije-Escuintle

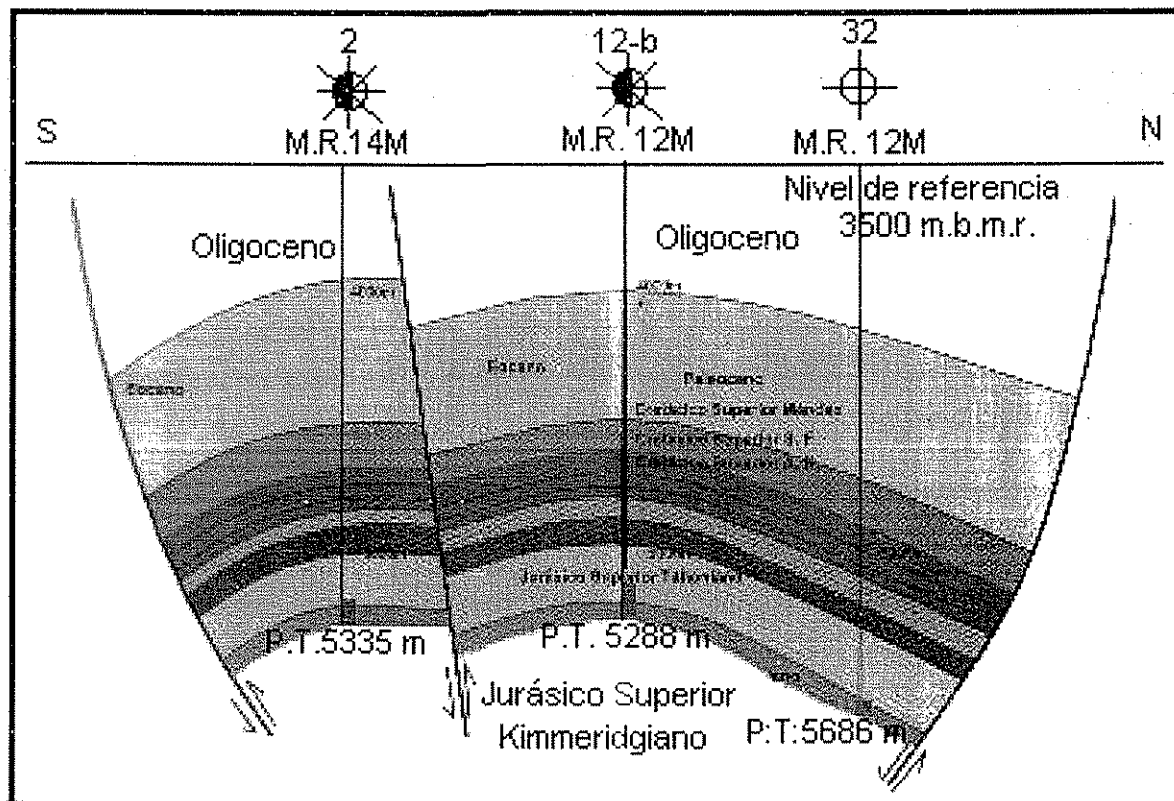


Figura 1-3 Sección estructural tipo Campo Luna-Palapa, en yacimientos del Cretácico y Jurásico

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

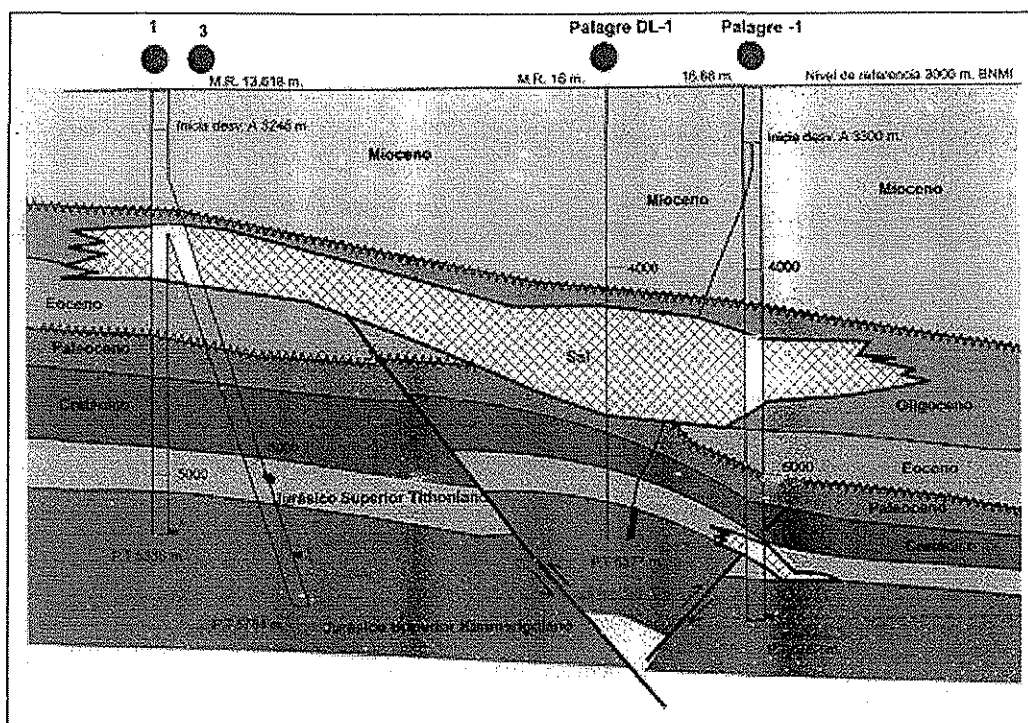


Figura 1-4 Sección estructural tipo del Campo Chinchorro en los contactos Yagual a Chinchorro.

En la mayoría de los pozos de la Región Sur la primer tubería de revestimiento de explotación puede ser una T.R. de 7" o bien una T.R. de 5", que dependiendo de la profundidad del yacimiento pueden ser tuberías cortas o corridas hasta la superficie. En la Tabla 1-1 se presenta el diseño de un pozo típico de la Región Sur<sup>2</sup> en donde la profundidad de asentamiento de las tuberías de revestimiento es variable y depende de la profundidad de los yacimientos.

TUBERÍA	DIÁMETRO (pg)	PROFUNDIDAD (m)
Conductora	20	50
Superficial	13 3/8	1000
Intermedia	9 5/8	3400
T.R. de Explotación	7	4200
T.R. de explotación	5	5500

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 1-1 Información sobre la geometría de un pozo típico de la Región Sur.

En la Figura 1-5 se muestra el arreglo típico de las tuberías de revestimiento en donde se puede observar las tuberías conductora, superficial, intermedia y de explotación usadas en los pozos de la Región Sur.

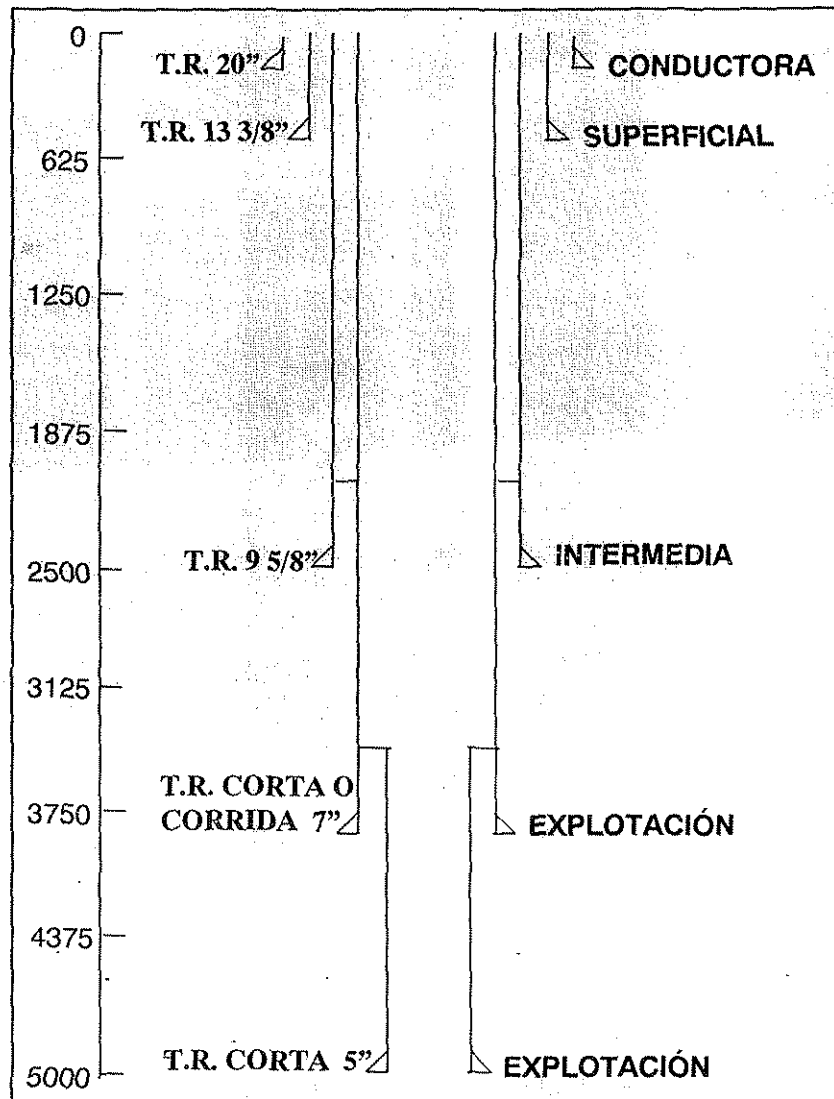


Figura 1-5 Arreglo típico de las tuberías de revestimiento de la Región Sur

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



En la Tabla 1-2 se muestra la tendencia de la profundidad en los pozos más profundos de la Región Sur.

AÑO	POZO	PROFUNDIDAD (m)
1975	SABANCUY 1	6453
1979	PAREDÓN 35-A	6463
1983	DORADO 7	6520
1984	JACINTO 1	6595
1984	ENCINO 101	6651
1984	JACOME 1	6700
1985	MERCEDES 101-A	6800
1985	GAUCHO 1	7005
1986	PARAMO 1	7300
1987	SABANERO 1	7500

Tabla 1-2 Tendencia de la profundidad en los pozos de la Región Sur

En forma similar en los pozos de la Región Sur se persigue una tendencia de incremento en la profundidad para alcanzar los yacimientos más profundos.

Los factores que contribuyen a las fallas de las cementaciones a nivel nacional y particularmente en los pozos de la Región Sur se mencionan a continuación.

### 1.3 FACTORES QUE CONTRIBUYEN A LAS FALLAS EN LAS CEMENTACIONES.

#### Asentamiento incorrecto de la tubería de revestimiento.

- Ventana de operación reducida entre los gradientes de formación y fractura.
- Contaminación del agua de mezclado.
- Determinación incorrecta de la temperatura.
- Deshidratación del cemento en el espacio anular.
- Uso de cemento inadecuado.
- Zapata o cople obstruido.
- Retardador insuficiente.

#### Falla al bombear el tapón.



- Alojamiento del tapón en la cabeza del cemento.
- Desplazamiento del tapón superior.
- Falta de tolerancia para compresión.
- Cálculos incorrectos de desplazamiento.

**Mezclado incompleto.**

- Falla mecánica.
- Presión o agua insuficiente.
- Falla del sistema de almacenamiento.

**Fuga de gas en el espacio anular.**

- Presión hidrostática insuficiente.
- Costras de enjarre entre las paredes del agujero y el cemento.
- Falta del volumen de cemento para cubrir arenas con gas.
- Deshidratación del cemento.

**Canalización.**

- Contacto de la tubería con la formación.
- Propiedades deficientes del lodo (alta viscosidad plástica y elevado punto de cedencia).
- Baja velocidad de desplazamiento.
- Agrandamiento del diámetro del pozo.

**Fraguado anticipado del cemento.**

- Proporción inadecuada del agua de mezclado.
- Estimación incorrecta de la temperatura.
- Fallas mecánicas.
- Aditivos o cemento inadecuado para las condiciones del pozo.
- Agua de mezcla caliente.
- Permitir que la lechada permanezca en reposo.
- Selección inadecuada de espaciadores lodo/cemento.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 1.4 CEMENTACIÓN DE LAS TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO<sup>2</sup>.

### 1.4.1 Tubería conductora.

Para la cementación de la tubería conductora los requisitos son mínimos debido a la poca profundidad, se debe cumplir con el tiempo suficiente para el bombeo y desplazamiento de la lechada de cemento más 1 hora adicional como factor heurístico de seguridad, así como desarrollar una resistencia a la compresión mínima de 105 kg/cm<sup>2</sup> a las 8 horas para continuar las operaciones. En estas operaciones generalmente se usa cemento y agua con un aditivo acelerador para ayudar al desarrollo de la compresión. También se adiciona un frente lavador de agua, con pirofosfato tetrasódico o en su caso cualquier frente lavador de los disponibles a nivel comercial.

### 1.4.2 Tubería superficial

Para perforar la sección donde se introduce este tipo de tuberías, se emplean fluidos de control de bajas densidades, debido a que el agujero atraviesa zonas poco consolidadas que no soportan cargas hidrostáticas mayores.

En la cementación de estas tuberías se emplean dos lechadas de cemento, la primera una lechada extendida es decir con una alta relación agua/cemento con mayor densidad sin perder de vista evitar fracturar la formación, con un controlador de filtrado, un retardador de fraguado para temperaturas bajas o moderadas, en cantidad y calidad suficiente para alcanzar el tiempo de bombeo, mezclado y fraguado más una hora como factor de seguridad. Además la resistencia a la compresión de la lechada no debe alcanzar valores inferiores de 35 kg/cm<sup>2</sup> en un tiempo de 12 horas, debido a que esta lechada cubre la mayor longitud de la tubería que se va a cementar. La segunda una lechada normal como lo especifica el American Petroleum Institute (API) con un agente regulador de filtrado y un agente dispersante para reducir las pérdidas de presión por fricción durante el desplazamiento en el espacio anular. Es importante señalar que a medida que se incrementa la velocidad en el espacio anular se mejora la eficiencia del desplazamiento de la lechada vigilando siempre que la presión de

fondo en la operación de cementación no rebase la presión de fractura de la formación. El tiempo de colocación de la lechada considera el tiempo de bombeo, mezclado y desplazamiento más una hora como factor de seguridad. Debe desarrollar una alta resistencia a la compresión bajo condiciones de temperatura estáticas de fondo, dentro de las primeras 12 horas de reposo después del desplazamiento, debido a que sirve de amarre a la zapata se considera que este cemento debe cubrir de 300 a 400 metros del fondo hacia arriba.

#### **1.4.3 Tubería intermedia.**

En la perforación del agujero en donde se introducen las tuberías intermedias, también se emplean fluidos de control de baja densidad, del orden de  $1.40 \text{ gr/cm}^3$ , debido a que se atraviesan zonas débiles poco consistentes y su procedimiento de diseño es similar al de las tuberías de revestimiento superficiales. Se usa una primera lechada extendida con una densidad de  $1.60 \text{ gr/cm}^3$  sin perder de vista la posibilidad de llegar a fracturar la formación y por otro lado que su resistencia a la compresión no caiga a valores inferiores de  $70 \text{ kg/cm}^2$  en un tiempo de 12 a 24 hrs en reposo bajo las condiciones de fondo. Este cemento cubre la mayor longitud de la tubería que se va a cementar en el espacio anular. Se usa un agente extendedor para disminuir la densidad de la lechada. La segunda lechada tiene una densidad normal como lo especifica el API similar al descrito para la tubería superficial. Como las temperaturas en la cementación de esta tubería alcanzan los  $100^\circ\text{C}$ , el diseño de las lechadas requiere la adición de 35% de harina de sílice para compensar el efecto de la disminución de la resistencia a la compresión por temperatura y vigilar que la presión de fondo de la cementación no llegue a ser igual o mayor que la presión de fractura de la formación.

#### 1.4.4 Tubería de explotación.

En la mayoría de los pozos del sistema, la tubería de explotación es la tubería de 7" o bien puede ser la tubería de revestimiento de 5". En la cementación de estas tuberías de revestimiento se emplean las siguientes alternativas.

➤ **Lechadas con densidad normal.**

En este caso, la densidad es de  $1.93 \text{ gr/cm}^3$  con cemento clase H y 52% de agua por peso de cemento con la adición de harina de sílice para evitar la regresión de la resistencia a la compresión, con un agente controlador de filtrado y un agente fluidizante para reducir al máximo las pérdidas de presión por fricción, durante el desplazamiento en el espacio anular. La eficiencia de desplazamiento en el espacio anular mejora cuando se incrementa la velocidad de flujo en el espacio anular. Se usa un retardador de fraguado para alta temperatura que se dosifica al cemento por ensaye y error iniciando con porcentajes bajos e incrementos del orden de un décimo en el producto hasta lograr el tiempo deseado para bombear, mezclar y desplazar la lechada más 1.5 horas como margen de seguridad y si el tiempo de bombeabilidad es superior a 5 horas se debe efectuar el trabajo con 2 unidades cementadoras.

También se debe evitar el contenido de agua libre debido a que esta tiende a ascender y dar lugar a la formación alterna de puentes de agua y sólidos asentados, con deslaves y/o microanulares.

En la práctica se supone que un valor de resistencia a la compresión de  $35 \text{ kg/cm}^2$ , el cual se obtiene agregando harina de sílice, es aceptable para que la capa de cemento soporte el peso de la tubería que se obtiene dentro de las primeras 8 horas de estar en reposo a las condiciones de fondo.

➤ **Lechadas de alta densidad.**

El incremento de la densidad se logra empleando un agente densificante de alto peso específico que no requiera la adición de agua tal como la hematita, la limadura de fierro o el sulfato de bario mediante un adecuado balance de materiales. También se puede incrementar disminuyendo el agua de mezclado pero se tiene que incrementar

el porcentaje de agente dispersante. Se emplea un agente para el control del filtrado y otro para mejorar la fluidez ya que a medida que se incrementa la velocidad de flujo se mejora la eficiencia de desplazamiento.

Se usa un retardador de fraguado para alta temperatura mediante el cual se logre alcanzar el tiempo de bombeo, mezclado y desplazamiento del cemento más 1.5 horas como margen de seguridad y en los casos en que el tiempo bombeable exceda 5.5 horas se debe efectuar el trabajo con 2 unidades cementadoras. Se debe alcanzar una resistencia a la compresión de 35 kg/cm<sup>2</sup>, como mínimo para que la capa de cemento soporte el peso de la tubería, el cual se obtiene dentro de las primeras 4 horas de estar en reposo a las condiciones de fondo.

➤ **Lechadas de baja densidad.**

La disminución de la densidad se logra usando un agente reductor de peso tal como la bentonita, la perlita, etc., y el diseño es similar al de las tuberías anteriores pero ahora para baja densidad, se consideran los parámetros reológicos en función del fluido de perforación, valor de filtrado, agua libre, tiempo de bombeo y resistencia a la compresión de acuerdo a los diseños del laboratorio. Se usan frentes de limpieza, un bache espaciador y uno lavador, para acarrear los sólidos generados por la barrena durante la perforación. Estos frentes deben reunir los siguientes requisitos: tipo, volumen, densidad y compatibilidad con el fluido de control y con la lechada.

La mayoría de los problemas que se presentan en las cementaciones primarias a nivel internacional se mencionan a continuación:

- Pobre desplazamiento del fluido de perforación, sólidos y camas de recortes sobre la longitud del agujero en donde se cementará la tubería.
- Pérdidas de circulación durante o después de la cementación.
- Tapones compuestos por enjarre de cemento.
- Contaminación del cemento con el fluido de perforación alrededor de la tubería y particularmente donde se encuentran camas de asentamiento de recortes, como ocurre en pozos direccionales cuando la tubería no se corre a la profundidad total.

- Asentamiento instantáneo de cemento cuando el agua de mezcla es muy dura por su contenido de Mg, Ca o Fe.
- Encogimiento del cemento por fallas en zonas aisladas.
- Permeabilidad después de la colocación de la lechada de cemento en zonas mal aisladas o con entradas de fluidos de formación.
- Migración de gas durante la colocación de las lechadas de cemento.
- Microanulares de cemento por efecto de presión y temperatura entre la tubería y el cemento.
- Problemas relacionados con altas presiones y temperaturas en pozos profundos.
- Asentamiento del cemento en pozos con altos ángulos de inclinación del agujero.
- Fallas por la mala calidad del cemento y/o los aditivos.

En la problemática expuesta gran parte de los factores de riesgo del proceso de cementación tienen una implicación directa en la dinámica de flujo de las lechadas de cemento durante las cementaciones y por tanto de su comportamiento reológico dependiente del proceso de hidratación en el tiempo. Un mayor entendimiento de este comportamiento permitirá minimizar los riesgos de falla durante el proceso de cementación. En las operaciones de cementación se presenta un proceso complejo y multifactorial donde las variables presión y temperatura tienen un marcado efecto sobre la relación esfuerzo y deformación en el tiempo. Este trabajo tiene por objeto obtener la evidencia experimental de la influencia de la presión y la alta temperatura en el comportamiento de las lechadas y posteriormente obtener un modelo matemático de este comportamiento.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS.

En las operaciones de perforación de los pozos petroleros se cementan hasta 2 tipos de tuberías superficiales, intermedias y de producción para alcanzar el objetivo de la formación productora, sin embargo esto puede variar dependiendo de los problemas encontrados durante la perforación y la profundidad donde se encuentren localizados los yacimientos.

Las funciones básicas que debe cumplir una cementación primaria<sup>3</sup> son las siguientes:

1. Proporcionar soporte a las tuberías de revestimiento.
2. Proteger la tubería de revestimiento de la corrosión.
3. Evitar el flujo de fluidos de una zona a otra a través del espacio anular, entre la pared del agujero y el exterior de la tubería de revestimiento.
4. Aislar el flujo de fluidos aceite, agua o gas entre formaciones.
5. Crear adherencia entre la pared del agujero y la tubería de revestimiento.
6. Proporcionar una base firme para el soporte del equipo de seguridad en la superficie.
7. Sellar o aislar zonas de pérdida de circulación.
8. Remediar una mala cementación primaria.
9. Aislar horizontes agotados.
10. Controlar la RGA y la RAA.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Algunas de estas funciones no se llegan a cumplir como en el caso de las formaciones naturalmente fracturadas, por problemas que ocurren durante las cementaciones, tales como pérdidas de circulación debido a las fracturas<sup>1</sup> o como en el caso de las arenas del terciario en donde es muy difícil evitar el flujo de agua.

Durante el proceso de operación el cemento se mezcla con agua en la superficie y se bombea por el interior de la tubería de revestimiento, donde se desplaza con fluido de perforación hasta colocarlo en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y el agujero.



El tiempo para su mezclado, bombeo y desplazamiento necesario para colocar la lechada de cemento en el sitio adecuado es conocido en la industria petrolera como "tiempo bombeable" y debe ser menor al tiempo máximo de espesamiento, para que el cemento se pueda colocar en el sitio deseado.

Después de que la lechada de cemento es colocada en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y el agujero, se espera el tiempo de fraguado que puede variar entre 8 y 24 horas, dependiendo del tipo de tubería, profundidad de asentamiento y aditivos empleados. Durante este tiempo la lechada de cemento pasa del estado líquido al sólido, alcanzando la suficiente resistencia a la compresión y adherencia para soportar adecuadamente la tubería de revestimiento.

Los rangos de profundidad, presión y temperatura a los que se somete la colocación de las lechadas de cemento en los pozos petroleros actuales son muy variados, por esta razón existen varios tipos de cementos aceptados por el API y más de 40 aditivos que se emplean para que las características óptimas de las lechadas, se ajusten a cualquier condición de un pozo en particular<sup>2</sup>.

Como una aproximación de ingeniería es común considerar que las lechadas de cemento tiene un comportamiento reológico similar al de los lodos de perforación, es por eso que para el cálculo de la hidráulica de las cementaciones se han usado los mismos modelos reológicos que para los fluidos de perforación.

Sin embargo cuando se efectúa una operación de cementación, la lechada de cemento se ve sometida a los gradientes de presión y temperatura característicos del lugar, esto aunado a que en la lechada de cemento ocurre una reacción química que depende del tiempo y que a su vez depende de la presión, así como, de la temperatura a que esta sometida la lechada de cemento, hace que se modifique el comportamiento reológico de las lechadas de cemento a pesar de los aditivos usados creándose una gel que incrementa la viscosidad de las lechadas de cemento.

Este comportamiento y el control de las propiedades reológicas se puede usar de tal manera que sirvan para mejorar las cementaciones debido a que durante el proceso de cementación de una tubería, la lechada de cemento se somete a tres tipos de régimen de flujo. Por ejemplo en el interior de la tubería de perforación se alcanza flujo turbulento, en el interior de la tubería corta o liner se tiene flujo tapón, en el anular

agujero-tubería corta se tiene flujo laminar al igual que en las fracturas de la formación<sup>1</sup>. Las lechadas de cemento al estar sometidas a estos tres tipos de régimen de flujo alcanzan velocidades de corte desde las más altas hasta las más bajas por lo tanto todas las lecturas de velocidad de corte son valiosas para comprender su comportamiento<sup>3</sup>.

## 2.1 CLASIFICACIÓN DE CEMENTOS.

Existen varias agrupaciones dedicadas a escribir y publicar las especificaciones de los cementos, dentro de estas las más conocidas son la ASTM (American Society Testing and Materials Institute) y la API (American Petroleum Institute). Esta última tiene los estándares para cementos utilizados en pozos petroleros, los cuales son publicados anualmente desde 1953. A continuación se presenta la clasificación de acuerdo a la norma 10-A del API<sup>4</sup>.

CLASIFICACIÓN API	AGUA REQUERIDA (lts/saco)	DENSIDAD DE LA LECHADA (g/cm <sup>3</sup> )	PROFUNDIDAD (m)	TEMPERATURA ESTÁTICA (°C)
A (portland)	23.36	1.87	0-1830	26.6-76.7
B (portland)	23.36	1.87	0-1830	26.6-76.7
C (resistencia prematura)	36.31	1.78	0-1830	26.6-76.7
D (retardado)	19.3	1.97	1830-3050	76.7-126.7
E (retardado)	19.3	1.97	3050-4270	76.7-143.3
F (retardado)	20.44	1.94	3050-4880	110-160.0
G (básico)	23.36	1.87	0-2440	26.6-93.3
H (básico)	19.3	1.87	0-2440	26.6-93.3

Tabla 2-1 Clasificación API de los cementos de acuerdo a la norma 10-A del API

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.2 CEMENTOS ESPECIALES<sup>5</sup>.

Además de los tipos de cemento antes mencionados, existen cementos especiales, los cuales se clasifican<sup>3</sup> en:

1. **Cementos Puzolánicos.** Las puzolanas son rocas formadas por espuma de origen volcánico, hacen al cemento más ligero e incrementan su resistencia a la compresión a bajo costo.
2. **Cementos con partículas ultrafinas de puzolana.** Usados para reacciones lentas, son fácilmente retardables, peso ligero, económicos, con gran estabilidad a las altas temperaturas y excelente resistencia a la compresión.
3. **Resinas o cementos plásticos.** Son mezclas de agua y resinas plásticas de cemento para el taponamiento de agujeros selectivos y disparos forzados.
4. **Cementos de yeso.** Son cementos semihidratados con yeso alcanzan rápidamente su resistencia con un 8 a 10% de concentración de yeso.
5. **Cementos con aceite diesel.** Son cementos G y H con diesel o keroseno y agentes activos de superficie, están limitados en cuanto a tiempo de bombeo y se usan para el control de agua durante la perforación o producción.
6. **Cementos de Calcio-Aluminato.** Son cementos refractarios con un alto contenido de aluminio 40% y una pequeña cantidad de sílice y fierro, tienen una alta resistencia a los esfuerzos y a la temperatura, además son útiles para atacar la corrosión química.
7. **Cementos con Latex.** Químicamente el latex se identifica como acetato de polivinilo, cloruro de polivinilo o una emulsión de estireno butadieno, mejora las fuerzas de adherencia y controla el filtrado de la lechada de cemento.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.3 PRUEBAS DEL CEMENTO<sup>4</sup>.

El API recomienda algunos procedimientos de prueba para los cementos utilizados en la perforación de los pozos petroleros para los cuales es necesario el siguiente equipo:

1. Una balanza de lodos para determinar la densidad de la lechada.
2. Una filtro prensa para determinar la velocidad de filtrado de la lechada.
3. Un viscosímetro rotacional para determinar las propiedades reológicas de la lechada.
4. Un consistómetro para determinar la velocidad de espesamiento y las características de consistencia de la lechada.
5. Un permeámetro para determinar la permeabilidad del cemento.
6. Moldes para las muestras de cemento y máquinas de prueba para la resistencia a la compresión y tensión del cemento.
7. Una autoclave para determinar la solidez.
8. Un turbidímetro para determinar la fineza del cemento.

Dados los objetivos de este trabajo nos enfocaremos a las pruebas que se realizan en el consistómetro y el viscosímetro.

### 2.3.1 CONSISTÓMETRO DE CEMENTO<sup>4</sup>.

El consistómetro se usa para realizar pruebas del cemento a presión atmosférica y presiones superiores. Este aparato consiste esencialmente de una cámara de confinamiento con paletas de agitación capaz de simular las presiones y temperaturas encontradas en las operaciones de cementación de los pozos.

La cámara cilíndrica de confinamiento se gira durante la prueba a una velocidad de 150 rpm. Cuenta con un sistema para el control de la temperatura y un regulador manual de presión. La consistencia de la lechada de cemento se define en términos del torque que esta ejerce sobre las paletas, es decir, la relación entre el torque y la consistencia de la lechada esta dada por la siguiente expresión:

$$B_c = \frac{T - 78.2}{20.02} \dots (2-1)$$

Donde:

T = Es el torque de las paletas en g-cm.

B<sub>c</sub> = Es la consistencia de la lechada en unidades de consistencia API.

El tiempo de espesamiento de la lechada esta definido como el tiempo requerido para alcanzar una consistencia de 100 B<sub>c</sub>. Este valor representa el límite de bombeabilidad. Por otro lado la prueba debe realizarse a la presión y temperatura significativas del pozo. A continuación se muestra un consistómetro presurizado para alta presión y temperatura , Figura 2-1.

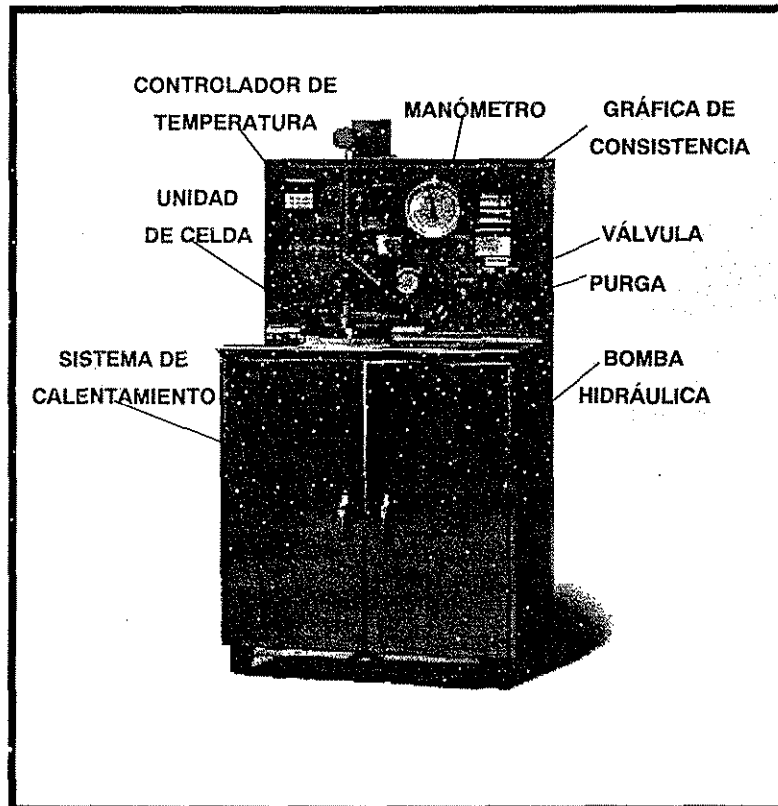


Figura 2-1 Consistómetro de alta presión y temperatura

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.3.2 VISCOSÍMETRO FANN 70.

El viscosímetro Fann 70 (Figura 2-2) es un viscosímetro de cilindros coaxiales de indicación directa, se utiliza para medir la reología de fluidos a alta presión (20000 psi) y temperatura (500 °F). Esta constituido por una celda de prueba de metales resistentes a la corrosión e incluye un bulbo, un rotor y un aparejo de torsión API<sup>4</sup>. Consta también de una estación de prueba a control remoto que tiene un sensor de ángulo magnético, una celda magnética, sistemas de calentamiento y enfriamiento automático y un sensor de temperatura. Además cuenta con una consola de control desde donde se manejan las velocidades de corte en RPM que pueden ser fijas (600, 300, 200, 100, 6, 3) ó variables, cuenta con una computadora para su calibración y así mismo con un controlador de temperatura. También cuenta con una bomba hidráulica para aplicar la presión.

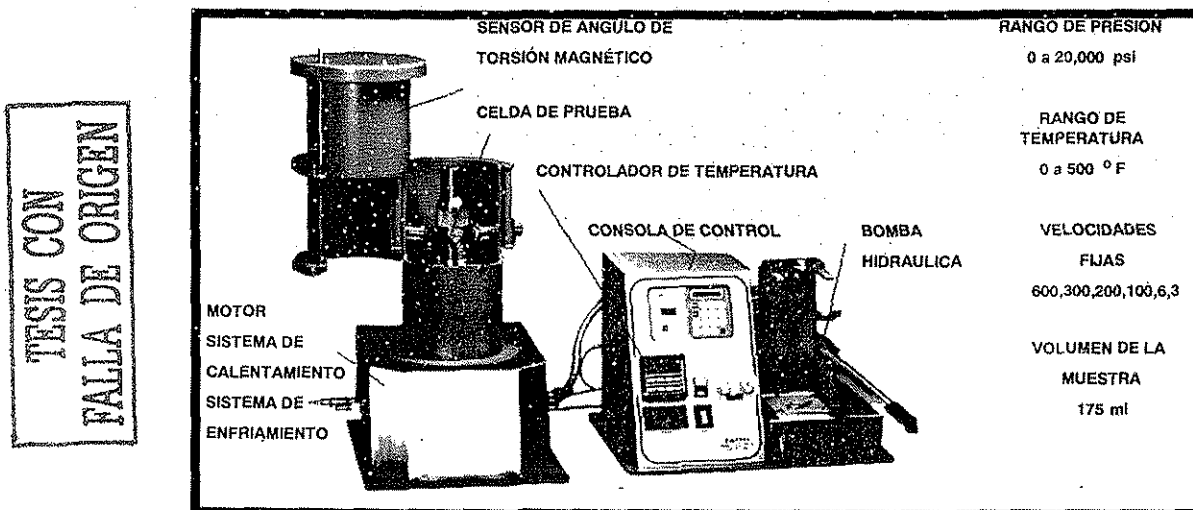


Figura 2-2 Viscosímetro Fann 70 para altas presiones y temperaturas

Las propiedades reológicas de la lechada de cemento son dependientes del tiempo, por lo tanto varían con la velocidad de espesamiento, además dependen también de la temperatura, la composición y la presión, esta última motivo de estudio en este trabajo. Los modelos reológicos utilizados para los fluidos de perforación se ajustan a las lechadas de cemento únicamente cuando no ha empezado a actuar la reacción de hidratación entre el cemento y el agua, es decir cuando el material no se ha comenzado a espesar, las propiedades reológicas de la lechada de cemento

comienzan a variar dependiendo de la velocidad de reacción del cemento. El objetivo de esta tesis se enfocará a determinar el comportamiento de las lechadas de cemento a las condiciones de temperatura encontradas en pozos de la Región Sur de PEMEX y con tres diferentes niveles de presión en función del tiempo, lo cual dará una indicación de lo ocurrido en el proceso de espesamiento así como del incremento de la viscosidad y su relación con el esfuerzo de corte, velocidad de deformación y velocidad con que reacciona químicamente el cemento.

Antes de entrar a discutir la reología de las lechadas de cemento, debemos tratar otros temas básicos que se incluyen en este trabajo de tesis para entender el comportamiento de las lechadas de cemento, tales como la composición química del cemento y la influencia de los aditivos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO 3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO.

El principal componente de la mayoría de los cementos utilizados en la perforación es el cemento Portland, llamado así por su inventor Joseph Aspdin quien produjo el sólido por primera vez en la isla de Portland en las costas de Inglaterra, el cual es un cemento artificial fabricado mediante la calcinación de caliza y arcilla pulverizada a una temperatura de  $1800^{\circ}\text{C}$  lo cual produce unas bolas de ceniza conocidas como clinker que contienen los cristales o minerales de los cuales se compone principalmente el cemento y que a continuación se mencionan:

Componente	Fórmula	Designación Estándar
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Tabla 3-1 Fórmulas y designaciones estándar de los componentes del cemento Portland.

Estas cenizas se pulverizan y se les adiciona posteriormente sulfato de calcio hidratado o yeso ( $\text{C}_a\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en una proporción de 1.5 a 3% y mineral de hierro<sup>5</sup>, para regular la acción química del cemento con el agua.

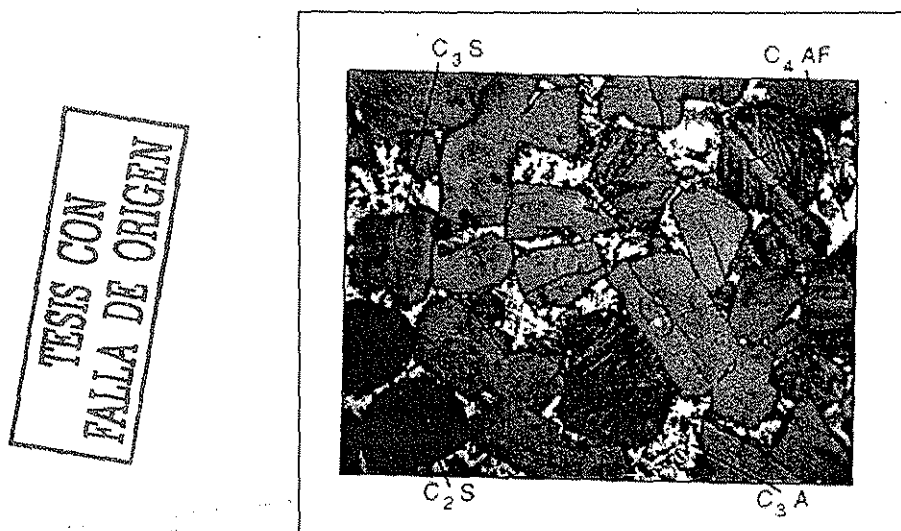


Figura 3-1 Vista de una sección microscópica del clincker de un cemento Portland.



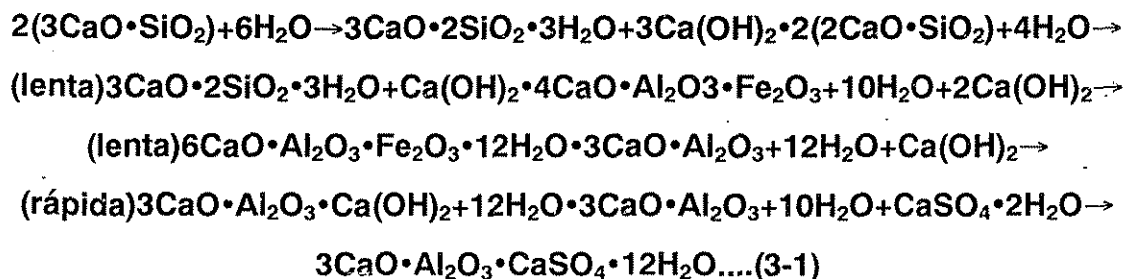
En la Figura 3-1 se muestra una sección microscópica del clíncker de un cemento Portland, en donde se puede observar sus componentes principales.

El proceso de fabricación del cemento consiste de los siguientes pasos:

- Secado y homogeneización de la materia prima.
- Trituración de roca caliza, arcilla y cenizas de fierro en un molino de bolas.
- Calcinación de los óxidos de calcio (Ca), aluminio (Al) y fierro (Fe) en un horno cilíndrico con revestimiento de ladrillo refractario a una temperatura de 1800°C.
- Enfriamiento brusco de las cenizas de la calcinación, para obtener como producto final el Clíncker.
- Trituración del Clíncker y combinación con el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en un molino de bolas.
- Almacenamiento en silos y empaque del cemento en sacos.

La reacción de hidratación del cemento es exotérmica y genera una considerable cantidad de calor especialmente la hidratación del silicato tricálcico  $\text{C}_3\text{A}$ .

A continuación se presenta la ecuación de la reacción química de hidratación<sup>5</sup> de los componentes del cemento cuando se mezclan con agua.



El principal componente de la cementación en los productos de reacción es  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  que se conoce como gel tobermorita, esta gel tiene diámetros de partículas extremadamente finos, por lo que cubren una gran área superficial. Las grandes fuerzas de atracción superficiales causan que la gel sea absorbida sobre los cristales del cemento y las partículas sean estrechamente ligadas. El exceso de agua reduce la resistencia del cemento y lo hace más poroso y permeable.

El silicato tricálcico  $C_3S$  es el que contribuye en mayor medida a la resistencia especialmente durante los primeros 28 días de fraguado, en este periodo es en donde se logra alcanzar la mayor resistencia a la compresión del cemento que es de aproximadamente  $350 \text{ kg/cm}^2$  y a partir de donde el incremento comienza a hacerse asintótico.

El silicato dicálcico  $C_2S$  se hidrata muy lentamente y contribuye principalmente al incremento de la resistencia a la compresión.

El aluminato tricálcico  $C_3A$  se hidrata muy rápidamente y produce la mayor cantidad de calor por hidratación durante los primeros días de fraguado.

La adición posterior del yeso al clinker pulverizado controla la rápida hidratación del aluminato tricálcico  $C_3A$ . La porción del  $C_3A$  del cemento es atacada rápidamente por el contenido de sulfatos del agua.

El aluminoferrito tetracálcico  $C_4AF$  tiene una hidratación muy similar a la del  $C_3A$  es mucho más lenta.

La composición y propiedades del cemento Portland API clases G y H se muestran en la Tabla 3-2.

Clase API	$C_3S$ %	$C_2S$ %	$C_3A$ %	$C_4AF$ %	Fineza Wagner ( $\text{cm}^2/\text{gr}$ )
G y H	50	30	5	12	1600 a 1800

Tabla. 3-2 Composición típica y propiedades de los cementos Portland API clases G y H

### 3.1 ANÁLISIS DE ÓXIDOS.

La composición química del cemento Portland generalmente se establece en términos del análisis de óxidos, en la Tabla 3-3 se muestra un análisis de óxidos típico.

ANÁLISIS DE ÓXIDOS TÍPICOS DE CEMENTOS PORTLAND (API Clase G o H cemento básico)	
OXIDO	PORCENTAJE
Dióxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ )	22.43
Oxido de Calcio ( $\text{CaO}$ )	64.77
Oxido de Hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	4.10
Oxido de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	4.76
Oxido de Magnesio ( $\text{MgO}$ )	1.14
Trióxido de Azufre ( $\text{SO}_3$ )	1.67
Oxido de Potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ )	0.08
Pérdida de Ignición	0.54

Tabla 3-3 Análisis de óxidos típicos de cementos Portland

En la Tabla 3-4 se presentan algunas propiedades de la lechada de cemento API sin aditivos clases G y H.

PROPIEDAD	G y H
Gravedad Específica	3.15
Area superficial ( $\text{cm}^2/\text{gr}$ )	1400-1700
Peso (lb/ saco)	94
Volumen ( $\text{pie}^3/\text{saco}$ )	1
Volumen Absoluto ( $\text{gal}/\text{saco}$ )	3.58

Tabla 3-4 Propiedades de los cementos API clases G y H

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.2 HIDRATACIÓN DE LAS FASES DE SILICATOS.

El silicato tricálcico  $C_3S$  es el que tiene la más alta concentración entre los constituyentes del cemento con un 70%, mientras que el silicato dicálcico no excede el 20%. Como se muestra en las dos ecuaciones químicas los productos de la hidratación para ambas fases son el silicato de calcio hidratado y el hidróxido de calcio conocidos como portlandita.



El silicato de calcio hidratado<sup>5</sup>  $C_3S_2H_3$  no tiene una composición exacta. Las relaciones C:S y H:S son variables y dependen de las concentraciones de calcio, en la fase acuosa de la temperatura y la presencia de aditivos en la mezcla. Este material es amorfo se conoce comúnmente como gel C-S-H y es considerado como el principal endurecedor del cemento. En la Figura 3-2 se muestra un precipitado de calcio en una matriz de gel C-S-H.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

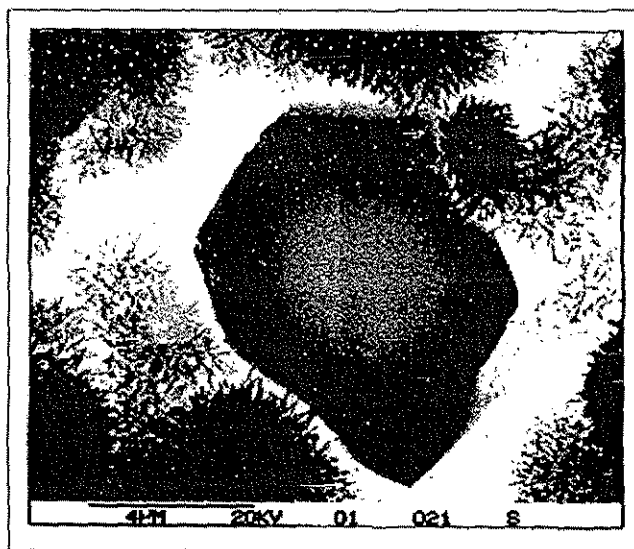


Figura 3-2 Fotografía de un precipitado de calcio  $Ca(OH)_2$  en una matriz de gel C-S-H.

La hidratación del  $C_2S$  es significativa solo en términos de la resistencia final cuando el cemento es totalmente endurecido.

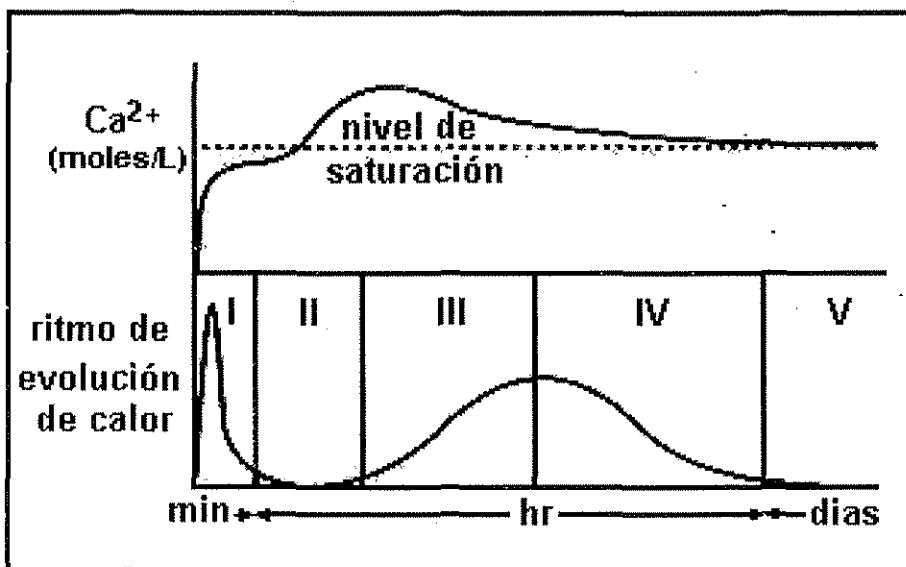
La hidratación del  $C_3S$  es un proceso exotérmico que ha sido estudiado por conducción de calor y su desarrollo se divide en los cinco periodos que a continuación se describen.

### 3.2.1 PERIODO DE PREINDUCCIÓN (I) <sup>5</sup>.

En este periodo de hidratación ocurre una reactividad baja a los pocos minutos de creada la mezcla y se le conoce como periodo de pre-inducción, se caracteriza por la alta capacidad de mojabilidad y la rapidez de hidratación de las arcillas.

### 3.2.2 PERIODO DE INDUCCIÓN (II) <sup>5</sup>.

Después de la rápida actividad de hidratación inicial, la velocidad de liberación de calor disminuye dramáticamente, debido a que en la gel de Silicato de Calcio Hidratado C-S-H se precipitan lentamente concentraciones de Calcio  $Ca^{2+}$  e Hidróxidos  $OH^-$  alcanzando supersaturaciones críticas como se muestra en la Figura 3-3 en donde se observa la precipitación de hidróxido de calcio.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3-3. Representación esquemática de los cambios en el sistema agua Silicato tricálcico  $C_3S$ .

Después de esta precipitación comienza nuevamente otro periodo de hidratación, que a temperatura ambiente, es de pocas horas, pero a condiciones de presión y temperatura elevadas es más rápido y significativo.

### 3.2.3 PERIODOS DE ACELERACIÓN (III) Y DESACELERACIÓN (IV)<sup>5</sup>.

Cuando finaliza el periodo de inducción, apenas se ha precipitado un pequeño porcentaje del ( $C_3S$ ). Los periodos de aceleración y desaceleración corresponden al periodo de asentamiento de estas partículas, que representa el intervalo más rápido de hidratación. Durante el periodo de aceleración, los cristales sólidos de hidróxido de calcio  $C_a(OH)_2$  de la solución se depositan en la gel C-S-H. **En este periodo los hidratos se agrupan internamente creando una cadena de cohesión y un sistema que comienza a desarrollar una resistencia a los esfuerzos conocida como viscosidad.**

La porosidad del sistema disminuye como consecuencia de la depositación de hidratos. Eventualmente la transportación iónica de las especies y el agua es inhibida a través de la cadena de gel silicato de calcio hidratado C-S-H y la hidratación se desacelera. A condiciones de presión y temperatura atmosféricas estos eventos ocurren en varios días.

### 3.2.4 PERIODO DE DIFUSIÓN (V)<sup>5</sup>.

En este periodo continúa la hidratación con un paso lento ligado siempre a la disminución de la porosidad del sistema, la cadena de los productos de la hidratación es más y más densa incrementando su resistencia a los esfuerzos.

No existe una evidencia mayor de los cambios estructurales, de cualquier modo también se ha observado una polimerización de los silicatos aniónicos de la gel de silicato de calcio hidratado C-S-H. La duración del periodo de difusión esta indefinida a condiciones de presión y temperatura atmosféricas. Los cristales de portlandita continúan creciendo enormemente durante la hidratación de los granos del  $C_3S$ .

### 3.3 HIDRATACIÓN DE LAS FASES DE ALUMINATOS.

Las fases de aluminatos especialmente la del  $C_3A$  son las más reactivas a tiempos cortos de hidratación. Si bien su abundancia es considerablemente inferior que la de los silicatos, *esta tiene una influencia significativa sobre la reología de las lechadas de cemento y su resistencia inicial a los esfuerzos durante el desarrollo del asentamiento de partículas en el cemento*<sup>5</sup>. La hidratación del  $C_3A$ , es muy similar a la del  $C_4AF$ . La hidratación del  $C_3A$  es una reacción que ocurre en la interface de los sólidos anhidricos y el agua. Es una reacción irreversible que conduce a la hidroxilación de los aniones superficiales  $AlO_2^-$  y  $O_2^-$  dentro de los aniones  $[Al(OH)_4]^-$  y  $OH^-$  resultando una solución supersaturada de los hidratos de aluminato cálcicos que conducen a su precipitación. La hidratación es controlada por el porcentaje del 3 al 5% de yeso que se adiciona al cemento durante su fabricación.

Los hidratos de aluminato cálcicos son muy estables y se presentan en cristales hexagonales, los cuales se convierten en cubos más estables. Como se muestra en la Figura 3-4.

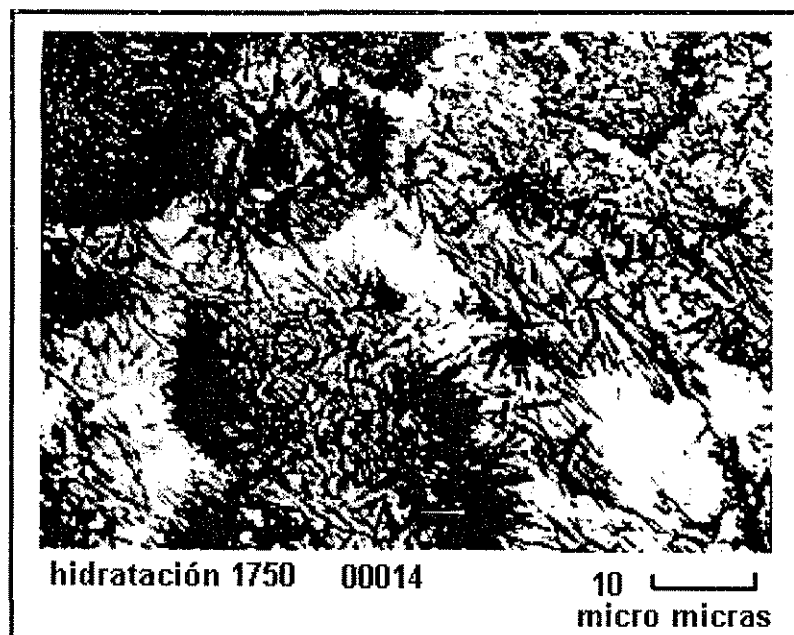


Figura 3-4. Fotografía de cristales de Ettringita.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El calcio y los iones sulfato forman una solución reactiva dando origen a hidratos de trisulfoaluminato de calcio, se caracteriza por ser un mineral constituido por cristales de Ettringita que se precipitan dentro de las superficies de  $C_3A$ , inhibiendo rápidamente su hidratación y creando así un periodo de inducción el cual se muestra en la Figura 3-5

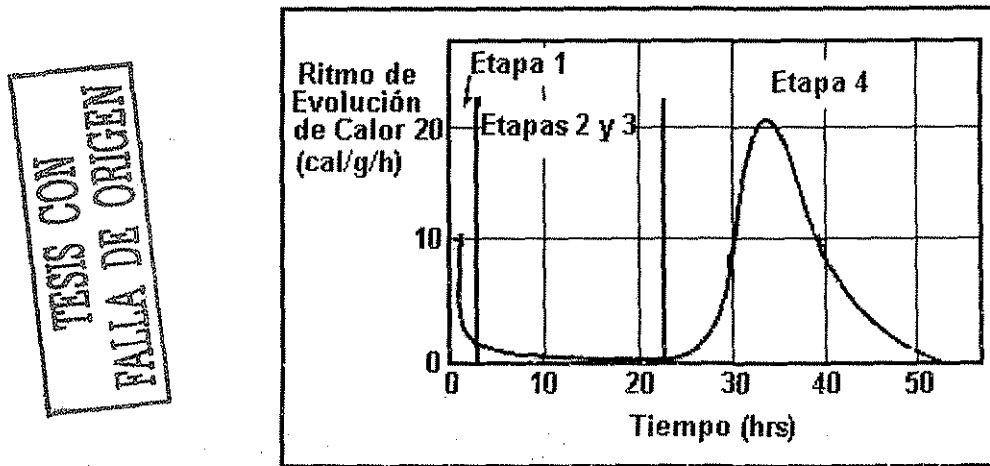


Figura 3-5. Termograma de hidratación del aluminato tricálcico  $C_3A$  con yeso (25°C).

Durante este periodo el yeso es totalmente consumido y la Ettringita continúa precipitándose hasta formar los hidratos de aluminato de calcio.

### 3.4 HIDRATACIÓN DEL SISTEMA MULTICOMPONENTE DE LOS CEMENTOS.

La hidratación de los cementos es una secuencia de traslape de las reacciones químicas entre los componentes del Clinker, el sulfato de calcio y el agua, que conduce a un espesamiento y endurecimiento continuo de las lechadas de cemento.

Si bien la hidratación del ( $C_3S$ ) es frecuentemente usada como modelo de hidratación de los cementos Portland se deben tomar en cuenta muchos parámetros adicionales que están involucrados.

Desde el punto de vista químico la hidratación del cemento es una disolución compleja y un proceso de precipitación como la hidratación que ocurre en las fases puras



individuales. Las diferentes reacciones de hidratación se realizan simultáneamente a diferentes velocidades. Las fases de hidratación de silicatos y aluminatos también tienen influencia entre sí.

Los productos de la hidratación no son puros. La gel C-S-H incorpora cantidades significativas de aluminio, hierro y azufre mientras que la Ettringita y las fases de monosulfoaluminatos contienen Silicón. El hidróxido de calcio también contiene pequeñas cantidades de iones externos de la mayoría de los silicatos.

A continuación en la Figura 3-6 se presenta un termograma de la hidratación del cemento portland<sup>5</sup>, este puede ser descrito como la adición de los termogramas para el C<sub>3</sub>S y el C<sub>3</sub>A ajustado para una concentración relativa.

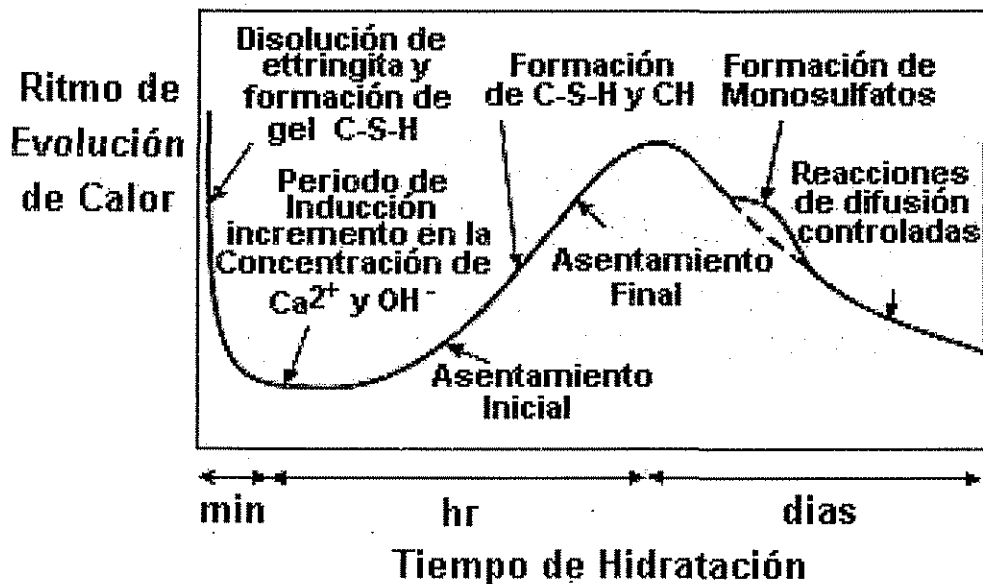


Figura 3-6 Representación esquemática de la hidratación del Cemento Portland.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO 4. ADITIVOS PARA LA CEMENTACIÓN.

En la actualidad la perforación de pozos petroleros cubre el más amplio rango de profundidades, presiones, temperaturas y retos en las condiciones de operación, por lo cual ha sido necesario desarrollar una amplia gama de aditivos para modificar las características de los cementos y acondicionarlos para los requerimientos individuales de los pozos. Dependiendo de los aditivos utilizados es posible modificar las características del cemento para lo cual mencionaremos algunos ejemplos:

### 4.1 MODIFICACIONES A LAS PROPIEDADES DEL CEMENTO CON EL USO DE ADITIVOS<sup>5,6</sup>.

Existe una gran cantidad de aditivos con los que se puede modificar las propiedades de las lechadas de cemento, dentro de los rangos adecuados y las condiciones características de cada una de las localizaciones de los pozos.

- La densidad se puede variar en un rango de 10.5 a 25 lb/gal (1.2 a 3 g/cm<sup>3</sup>).
- La resistencia a la compresión puede alcanzar rangos desde 200 a 20,000 lb/pg<sup>2</sup>.
- El tiempo de colocación se puede acelerar o retardar desde pocos segundos hasta arriba de 36 horas.
- El filtrado del cemento se puede reducir hasta alcanzar una cantidad tan pequeña como la de 25 cm<sup>3</sup>/30 minutos, medidos a través de una malla 325 mesh a una presión diferencial de 1,000 lb/pg<sup>2</sup>.
- Las propiedades de flujo se pueden variar en un amplio rango.
- La colocación del cemento se puede hacer resistente a la corrosión densificando o variando la composición química de este.
- Los materiales fibrosos, granulares o los agentes de puenteo tales como las escamas, así como los agentes gelificantes se pueden adicionar para el control de las pérdidas de circulación en las formaciones con estos problemas.
- Se puede tener elasticidad para la colocación de los cementos, incorporando fibras finas en la composición de las lechadas.

- Se puede controlar la permeabilidad en pozos a bajas temperaturas con sílice fluorado.
- Reducir costos dependiendo de los requerimientos del pozo y las propiedades deseadas.
- Las lechadas de cemento se pueden adelgazar o expandir usando yeso, cloruro de sodio o ambos.
- El calor de hidratación se puede controlar usando bicarbonato de sodio o bentonita en combinación con agua.

## 4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ADITIVOS<sup>5,6</sup>.

Los aditivos pueden ser clasificados de la siguiente manera:

1. **Aceleradores:** Permiten acelerar el fraguado del cemento.
2. **Retardadores:** Sirven para retrasar el tiempo de fraguado de la lechada.
3. **Densificantes:** Aditivos para el incremento de peso.
4. **Dispersantes:** Son productos químicos que reducen la viscosidad de las lechadas.
5. **Aditivos para aligerar el peso de la lechada.**
6. **Aditivos para el control de pérdidas de circulación.**
7. **Aditivos para el control del filtrado.**
8. **Reductores de fricción.**

## 4.3 ACELERADORES<sup>5,6</sup>.

Se usan para acelerar el tiempo de fraguado y el tiempo de espesamiento o para incrementar la resistencia a la compresión en formaciones someras de baja temperatura menores de 100°F (Tabla 4-1). Los de mayor aplicación son el Cloruro de calcio, Cloruro de sodio y Sulfato de calcio.

ACELERADORES DE CEMENTO	
ACELERADORES	CANTIDAD USADA (PORCENTAJE REFERIDO AL PESO DE CEMENTO)
Cloruro de Calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) hojuelas, polvos y anhídridos	2 a 4
Cloruro de Sodio ( $\text{NaCl}$ )	3 a 10 o 1.5 a 5
Formas Semihidratadas de yeso	20 a 100
Silicato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_2$ )	1 a 75
Cementos con dispersantes	0.5 a 1.0
Agua de Mar	-

Tabla 4-1 Aditivos aceleradores de cemento

1. **Cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ).** Se usa en un rango del 2 al 4% en proporción del peso de cemento usado para mezclas de cemento que requieren altas relaciones de agua (Tabla 4-2). Es el producto que tiene mayor control en el tiempo bombeable.

<ul style="list-style-type: none"> <li>RELACIÓN DE AGUA: 5.2 gal/saco</li> <li>PESO DE LA LECHADA: 15.6 lb/gal</li> </ul>								
TIEMPO DE ESPESAMIENTO (hrs)								
PRUEBAS DE CEMENTACION DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO API PARA UN POZO A DIFERENTES PROFUNDIDADES SIMULADAS (pies)					PRUEBAS PARA UNA CEMENTACION FORZADA API PARA UN POZO A DIFERENTES PROFUNDIDADES SIMULADAS (pies)			
Cloruro de Calcio%	1000	2000	4000	6000	1000	2000	4000	6000
0.0	4:40	4:12	2:30	2:30	3:30	3:29	1:52	0:58
2.0	1:55	1:44	1:26	1:10	1:30	1:20	0:54	0:30
4.0	0:50	0:52	0:50	0:58	0:48	0:53	0:37	0:23
RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)								
A PRESION Y TEMPERATURA DE FRAGUADO API								
TIEMPO DE FRAGUADO (horas)	CLORURO DE CALCIO (porcentaje)	40 °F atm	60 °F atm	80 °F atm	800 psi 95 °F	1600 psi 110 °F		
6	0	suspendida	20	75	235	860		
12	0	suspendida	70	405	1065	1525		
24	0	30	940	1930	2710	3680		
48	0	505	2110	3920	4820	5280		
6	2	suspendida	460	850	1170	1700		
12	2	65	785	1540	2360	2850		
24	2	415	2290	3980	4450	5025		
6	4	suspendida	755	1095	1225	1720		
12	4	15	955	1675	2325	2600		
24	4	400	2420	3980	4550	4540		

Tabla 4-2 Efecto del cloruro de calcio sobre el tiempo de espesamiento y la resistencia a la compresión del cemento API clase G.

2. **Cloruro de Sodio (NaCl).** Es un acelerador efectivo que se usa en un rango de concentraciones en el rango de 1.5 a 5% en peso de cemento. De 2 a 3.5% proporciona un máximo de aceleración, excepto cuando las lechadas tienen una alta relación de agua. Bajos porcentajes de cloruro de sodio aceleran el cemento, pero cuando los porcentajes de concentración son altos el agua de mezclado se satura con lo que se provoca un efecto retardante (Tabla 4-3).

RELACIÓN DE AGUA: 5.2 gal/saco					
PESO DE LA LECHADA: 15.6 lb/gal					
TIEMPO DE ESPESAMIENTO EN (horas:min)					
PRUEBAS DE CEMENTACIÓN EN TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO (API) PARA VARIAS PROFUNDIDADES SIMULADAS DE POZOS (pies).					
CLORURO DE SODIO (%)	1000	2000	4000	6000	
0.0	4:40	4:12	2:30	2:25	
2.0	3:05	2:27	1:52	1:13	
4.0	3:05	2:35	1:35	1:20	
RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)					
A PRESIÓN Y TEMPERATURA DE FRAGUADO API					
TIEMPO DE FRAGUADO (horas)	CLORURO DE SODIO (%)	40 °F atm	80 °F atm	800 psi 95 °F	1600 psi 110 °F
12	0	70	405	1065	1525
24	0	940	1930	2710	3680
48	0	2110	3920	4820	5280
12	2	290	960	1590	2600
24	2	1230	2260	3200	3420
48	2	3540	3250	3900	4350
12	4	280	1145	1530	2575
24	4	1390	2330	3150	3340
48	4	3325	3500	3825	4125

Tabla 4-3 Efecto del cloruro de sodio sobre el tiempo de espesamiento y la resistencia a la compresión de cementos API clase G

3. **Sulfato de calcio (CaSO<sub>4</sub>).** Es un material que por sí mismo posee características cementantes y tiene una fuerte influencia en expandir el cemento fraguado; como acelerador se dosifica basado en el tiempo que se desea y la temperatura a la cual se va a trabajar. Su concentración varía del 50 al 100% por peso de cemento.

4. **Cementos con yeso.** Estan compuestos de yeso semihidratados a partir de sulfato cálcico se usan para acelerar los cementos portland en concentraciones del 20 al 100% sobre el peso del cemento. El tiempo de espesamiento se puede acortar hasta 5 min.(Tabla 4-4)

YESO SEMIHIDRATADO (lb)	AGUA (gal)	PESO DE LA LECHADA (lb/gal)	VOLUMEN DE LA LECHADA (gal)	TIEMPO DE COLOCACION (min) DE 60 A 180 °F	RESISTENCIA A LA COMPRESION A 1 HORA DESPUES DE COLOCADA (psi)
100	4.8	15.0	9.3	50 a 60	2500
<ul style="list-style-type: none"> <li>• MEZCLA YESO CEMENTO (50/50)</li> <li>• CEMENTO: API CLASE G</li> <li>• RELACION DE AGUA: 5.0 gal/saco</li> <li>• PESO DE LA LECHADA: 15.3 lb/gal</li> </ul>					
RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi) A 72 °F DESPUES DE LAS SIGUIENTES HORAS					
TIEMPO DE COLOCACION EN (min)	TIEMPO DE ESPESAMIENTO (horas:min) A 80°F	2	4	8	24
12 a 20	0:23	685	725	730	1080

Tabla 4-4 Propiedades de las composiciones de yeso y yeso cemento

5. **Silicatos de Sodio.** Se usan para acelerar las lechadas de cemento, contienen Carboximetil-Hidroxietyl-Celulosa (CMHEC).

LECHADAS DE CEMENTO API CLASE G CONTENIENDO CARBOXIMETIL-HIDROXIETIL-CELULOSA (CMHEC)								
<ul style="list-style-type: none"> <li>• RELACION DE AGUA: 6.0 gal/saco</li> <li>• LA LECHADA: 15.0 lb/gal</li> </ul>								
RESISTENCIA A LA COMPRESION A 24 HORAS EN (psi)					TIEMPO DE ESPESAMIENTO (horas:min)			
SILICATO DE SODIO (%)								
RETARDA DOR CMHEC (%)	0	1	3	5	0	1	3	5
A 2000 pies (Temperatura de fondo estática: 110 °F)								
0.3	*	*	1360	1370	*	*	8:00+	8:00+
0.5	*	*	1080	1250	*	*	8:00+	8:00+
0.7	*	*	810	1080	*	*	8:00+	8:00+
A 8000 pies (Temperatura fondo estática: 200 °F)								
0.3	3060	3220	2630		8:00+	6:25	3:19	2:40
0.5	3340	3310	2860		8:00+	8:00+	5:45	3:55
0.7	2530	3122	2690		8:00+	8:00+	6:00+	4:06

Tabla 4-5 Efectos del silicato de sodio sobre el tiempo de espesamiento y la resistencia a la compresión de lechadas de cemento

6. **Cementos con dispersantes y reductores de agua.** Las lechadas de cemento se pueden acelerar por densificación es decir mediante la adición de reductores de fricción y la disminución de la cantidad del agua de mezclado (Tabla 4-6).

CEMENTOS API CLASE G				
AGUA (gal/saco)	DISPERSANTE (%)	PESO DE LA LECHADA (lb/gal)	VOLUMEN DE LA LECHADA (pie <sup>3</sup> /saco)	TIEMPO DE ESPESAMIENTO (horas:min)
5.20		15.6	1.18	2:15
3.78	1.0	17.0	0.99	1:40
3.38	1.0	17.5	0.93	1:15

Tabla 4-6 Efecto de la densificación sobre el tiempo de espesamiento de cementos

7. **Agua de mar.** El agua de mar tiene una concentración de 16,600 a 23,300 ppm de cloruros por lo cual actúa como acelerador.

ANÁLISIS DEL AGUA DE MAR (Componentes en miligramos por litro)						
COMPONENTES	GOLFO DE MÉXICO	INTERIOR DE ALASKA	TRINIDAD	GOLFO PÉRSICO	GOLFO DE SUEZ	ISLANDIA
CLORUROS	19000	16600	19900	23000	23300	18900
SULFATOS	2500	2000	2400	3100	3100	2260
BICARBONATOS	127	140	78	171	134	140
CARBONATOS	12	0	27	24	11	
SODIO Y POTASIO	10654	9319	11170	13044	12499	10690
MAGNESIO	1300	1080	1300	1500	1570	1199
CALCIO	400	360	408	520	464	370
TOTAL DE SÓLIDOS DISUELTOS	33993	29499	35283	41359	40078	33559
PH	8.2	8.0	8.3	8.2	8.2	7.3
GRAVEDAD ESPECÍFICA	1.026	1.023	1.027	1.031	1.03	1.022
TEMPERATURA °F	75	71	70	74	75	-

Tabla 4-7 Análisis del agua de mar

LECHADAS DE CEMENTOS API CLASES G Y H					
TIEMPO DE ESPESAMIENTO (horas:min)			RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (psi)		
PROFUNDIDAD (pies)			TEMPERATURA DE FRAGUADO (°F)		
	6000	8000	50	110	140
CEMENTO API CLASE A					
AGUA DULCE	2:25	1:59	435	3230	4025
AGUA DE MAR	1:33	1:17	520	4105	4670
CEMENTO API CLASE H					
AGUA DULCE	2:59	2:16	380	1410	2575
AGUA DE MAR	1:47	1:20	460	2500	3085

Tabla 4-8 Efectos del agua de mar y agua dulce sobre el tiempo de espesamiento y resistencia a la compresión de lechadas de cementos

#### 4.4 RETARDADORES<sup>5,6</sup>:

Estos aditivos se usan para prolongar el tiempo de fraguado del cemento. El incremento de temperatura aumenta el espesamiento de la lechada a diferente ritmo que el incremento de profundidad, estos aditivos deben ser compatibles con los demás aditivos usados en la lechada de cemento (Tabla 4-9).

RETARDADORES COMUNMENTE USADOS	
MATERIAL	CANTIDAD USUALMENTE USADA
LIGNITOS	0.1 A 1.0 % EN PESO DE CEMENTO
LIGNOSULFONATOS DE CALCIO, ACIDOS ORGÁNICOS	0.1 A 2.5 % EN PESO DE CEMENTO
CARBOXIMETIL-HIDROXIETIL-CELULOSA (CMHEC)	0.1 A 1.5 % EN PESO DE CEMENTO
SALMUERA SATURADA	14 A 16 lb/saco de cemento
SALES DE BORO	0.1 A 0.5 % EN PESO DE CEMENTO

Tabla 4-9 Retardadores

1. **Lignitos.** Son sales de ácidos lignosulfónicos, tales como gomas, almidones, ácidos orgánicos débiles y derivados celulósicos. En los cementos G y H los retardadores incrementan la profundidad a que se pueden usar los cementos desde 2440 m a 9146 m (8000 a 30000 pies). Los aditivos con altas relaciones de agua requieren retardadores adicionales para lograr un tiempo de espesamiento deseable. Son polímeros derivados de las maderas y se usan en un rango de 0.1 a 1% por peso de cemento 92 lb/saco (Tabla 4-10).



LECHADAS DE CEMENTO CLASE G O H				
TIEMPO DE ESPESAMIENTO (horas y minutos)				
RETARDADOR (%)	PROFUNDIDAD SIMULADAS EN LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO (pies)			
	8000	10000	12000	14000
0.0	1:56	1:26	1:09	1:00
0.2	2:15	2:12	1:38	1:25
0.3	3:38	2:40	2:14	1:58
0.4	4:42	3:36	3:10	2:58

Tabla 4-10 Efecto retardador del lignosulfonato de calcio sobre las lechadas de cemento

2. **Acidos orgánicos.** Son lignosulfonatos de Calcio. Se usan en un rango de concentración de 0.1 a 2.5% (Tabla 4-11).

CEMENTOS API CLASE G O H				
TEMPERATURA (°F)				
PROFUNDIDAD (pies)	TEMPERATURA ESTÁTICA (°F)	TEMPERATURA CIRCULANDO (°F)	RETARDADOR (%)	TIEMPO DE ESPESAMIENTO (horas)
CEMENTACION DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO				
4000 A 6000	140-170	103-113	0.0	3 A 4
6000 A 10000	170-230	113-144	0.0-0.3	3 A 4
10000 A 14000	230-290	144-206	0.3-0.6	2 A 4
14000 A 18000	290-350	206-300	0.6-1.0	REQUIERE EL USO DE LIGNITOS MODIFICADOS
CEMENTACIONES FORZADAS				
2000 A 4000	110 A 140	98-116	0.0	3 A 4
4000 A 6000	140 A 170	116-136	0.0-0.3	2 A 4
6000 A 10000	170 A 230	136-186	0.3-0.5	3 A 4
10000 A 14000	230 A 290	186-242	0.5-1.0	2 A 4
MÁS DE 14000	MÁS DE 290	MÁS DE 242	MÁS DE 1.0	REQUIERE EL USO DE LIGNITOS MODIFICADOS

Tabla 4-11 Cantidad recomendada y tiempo de espesamiento del retardador lignosulfonato de calcio para cementos

3. **Carboximetil-Hidroxietil Celulosa (CMHEC).** Se usa en un rango de 0.1 a 1.5%.
4. **Salmuera saturada.** Se usa de 14 a 16 lb/saco de cemento.
5. **Lignosulfonatos.**

Los retardadores más comúnmente usados para la cementación de pozos son las sales sódicas y cálcicas de los ácidos lignosulfónicos Figura 4-1.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

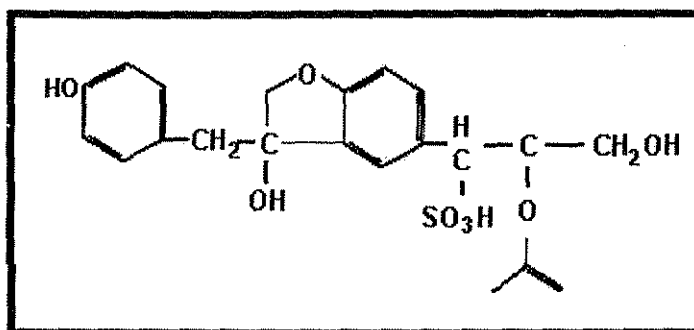


Figura 4-1 Estructura química básica de un Lignosulfonato

Los lignosulfonatos son polímeros derivados de la pulpa de la madera; por lo tanto no son usualmente refinados y contienen varias cantidades de componentes sacáridos. Su peso molecular promedio varía de 20,000 a 30,000 (g/g-mol). Por lo tanto los lignosulfonatos purificados pierden mucho su potencia retardadora, la acción retardadora de estos aditivos es frecuentemente atribuida a la presencia de carbohidratos de bajo peso molecular, tales como las pentosas, hexosas, glucosas, fructosas y por los ácidos glucónicos. Los retardadores de lignosulfonatos son efectivos con todos los cementos Portland y generalmente se adicionan en concentraciones que van de 0.1% a 1.5% en peso de cemento. Dependiendo del contenido de carbohidratos y de la estructura química y naturaleza del cemento, son efectivos alrededor de una temperatura de circulación de fondo de 122°C. El rango de temperatura de los lignosulfonatos puede extenderse hasta 315°C cuando se adiciona borato de sodio.

Actualmente se ha establecido que los lignosulfonatos retardan afectando predominantemente la cinética de hidratación del  $C_3S$ . De cualquier modo sus efectos sobre la hidratación del  $C_3A$  no son significativos.

La investigación científica ha demostrado que los sulfonatos y los grupos hidróxilos son absorbidos dentro de las capas de la gel C-S-H. Porque en las áreas más altas de superficie específica de la gel C-S-H, se puede considerar que el lignosulfonato se incorpora dentro de la estructura hidratada con un cambio consecuente de la morfología para dar como resultado una estructura más impermeable.

Una acción para corregir las pruebas de adsorción del lignosulfonato, evitan en extremo una hidratación significativa y también algunos de los lignosulfonatos permanecen en la fase acuosa. Esto puede suceder en un estado libre y/o ligado a los iones calcio a través de interacciones electrostáticas. Se ha demostrado que a bajas concentraciones de calcio los cristales crecen y probablemente la nucleación de los hidróxidos de calcio se inhibe. Si bien el comportamiento de la gel C-S-H hasta ahora no ha tenido resultados similares a los que podían haber sido esperados. Un cambio significativo en el tamaño y la morfología de los cristales de hidróxido de calcio también pueden ser observados cuando el  $C_3S$  se hidrata en presencia de lignosulfonatos. Estos resultados demuestran que si la nucleación y el crecimiento de los cristales de los productos de hidratación son obstaculizados por la presencia de aditivos, la velocidad de hidratación también disminuye en forma similar.

El comportamiento retardador de los lignosulfonatos funciona mejor en cementos con bajos porcentajes de  $C_3A$ . Cuando el  $C_3A$  es hidratado en presencia de aditivos orgánicos tales como los lignosulfonatos, las soluciones concentradas de aditivos fallan rápidamente. La hidratación de los productos del  $C_3A$  inicialmente tiene efectos de adsorción más fuertes que los del  $C_3S$ . En un sistema de cemento Portland la hidratación del  $C_3A$  puede impedir que se forme una cantidad significativa de lignosulfonatos a partir de la reacción de las superficies de los productos de hidratación del  $C_3S$ , como resultado de esto la eficiencia de los aditivos se reduce.

## **6. Ácidos hidrocarboxílicos.**

Los ácidos hidrocarboxilos contienen grupos hidróxilos (OH) y carboxilos (CHn) en sus estructuras moleculares. Las sales de gluconatos y glucoheptonatos son los materiales más ampliamente usados en esta categoría. Estos tienen una potente acción retardadora y pueden causar fácilmente una sobreretardación a temperaturas de circulación en el fondo del agujero menores de  $93^{\circ}C$ . Estos materiales son eficientes a temperaturas aproximadas de hasta  $150^{\circ}C$ .

Otro ácido hidrocarboxílico con un fuerte efecto retardador es el ácido cítrico que también es efectivo como dispersante del cemento el cual es usado normalmente a concentraciones entre 0.1 a 0.3 % en peso de cemento.

La acción retardadora de los ácidos hidrocarboxilos y sus sales son atribuidos generalmente a la presencia de grupos alfa o beta hidrocarboxilos HO-C-CO<sub>2</sub>H y HO-C-C-CO<sub>2</sub>H respectivamente que son capaces de separar fuertemente un catión de metal tal como el calcio. Anillos altamente estables de 5 o 6 membranas los cuales se forman por la absorción parcial dentro de la superficie del cemento hidratado y evitan la formación de núcleos en los sitios de los productos de la hidratación. Similarmente a los lignosulfonatos, los ácidos hidrocarboxílicos actúan más eficientemente en cementos con bajo porcentaje de C<sub>3</sub>A.

#### **7. Componentes Sacáridos.**

Los componentes sacáridos o azúcares son conocidos como excelentes retardadores del cemento Portland. Los mejores retardadores en esta categoría son los que contienen 5 miembros de anillos tales como la sacarosa y la refinosa, estos retardadores son muy sensitivos a pequeñas variaciones en la concentración, por lo tanto, los componentes no son comúnmente usados en la cementación de pozos.

La acción retardadora de los componentes sacáridos ha sido recientemente investigada y ha mostrado ser función de la susceptibilidad de sus componentes a la degradación por la hidrólisis alcalina. Los azúcares se convierten en ácidos sacarínicos que contienen grupos alfa-hidroxicarbonilos (HO-C-C=O) que son absorbidos fuertemente sobre las superficies de la gel C-S-H que estan contaminadas por la adsorción de los ácidos aniónicos del azúcar.

#### **8. Derivados celulósicos.**

Los polímeros celulósicos son polisacáridos derivados a partir de la madera u otros vegetales y son estables a las condiciones alcalinas de las lechadas de cemento. La fijación retardadora es probablemente el resultado de la adsorción del polímero dentro

de la superficie del cemento hidratado. Las partes activas son los oxidoetilenos y los grupos carboxilos.

Los retardadores más comunes son los celulósicos carboximetil-hidroxietyl-celulosa (CMHEC). La CMHEC es un retardador efectivo a temperaturas arriba de 120°C. En su comportamiento típico se presenta un gran número de efectos secundarios con la CMHEC. Esta se usa frecuentemente como un agente de control de pérdida de fluidos. Además la CMHEC incrementa significativamente la viscosidad de la lechada.

### **9. Organofosfatos.**

Los ácidos alcalino fosfónicos han sido recientemente identificados como aditivos retardadores para la cementación de pozos. Por lo tanto los materiales tienen excelente estabilidad hidrolítica y dependiendo de la cadena molecular es efectiva para la circulación a temperaturas tan altas como 204°C.

Los componentes fosfometilados contienen grupos de amonio cuaternarios y también son eficientes. Los organofosfatos tienen ventajas para su aplicación en las cementaciones de pozos por su aparente insensibilidad a las variaciones en la composición del cemento y su tendencia para bajar la viscosidad de las lechadas de cemento con alta densidad. Se conoce muy poco del mecanismo de acción; de cualquier modo es probable que los grupos de fosfonatos sean adsorbidos dentro de la superficie del cemento hidratado.

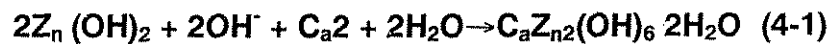
### **10. Componentes inorgánicos.**

La mayoría de los componentes inorgánicos retardan la hidratación de los cementos Portland. Las mejores clases de estos materiales se listan a continuación.

- Los ácidos y las sales: Bóricas, fosfóricas, hidrofluóricas y de cromo.
- El cloruro de sodio: en concentraciones mayores de 20% en peso de cemento.
- Los óxidos de zinc y plomo.

En la cementación de pozos el óxido de zinc  $Zn(OH)_2$  algunas veces es usado para retardar cementos tixotrópicos porque no afectan la reología de la lechada o esta no afecta la hidratación del sistema Yeso- $C_3A$ .

El efecto retardador del óxido de zinc se atribuye a la precipitación del hidróxido de zinc sobre los granos de cemento. El hidróxido de zinc  $Zn(OH)_2$  tiene una baja solubilidad ( $K_s=1.8 \times 10^{-14}$  1/g-mol-seg) y se deposita como una gel coloidal, consecuentemente las capas tienen baja permeabilidad. El efecto retardador finaliza cuando la gelatinosidad del hidróxido de zinc se transforma eventualmente en hidroxizincato de calcio cristalino.



El tetraborato de sodio decahidratado (**borax:  $N_{a2}B_4O_7 \cdot 10H_2O$** ) es comúnmente usado adicionalmente al retardador, este tiene la habilidad de extender el rango de temperatura de la mayoría de los lignosulfonatos retardadores para ampliar el rango de temperatura efectiva hasta los  $315^\circ C$ ; de cualquier modo esto puede ir en detrimento de la efectividad de los aditivos celulósicos y las poliaminas para pérdida de fluidos. A continuación se detalla el mecanismo de acción de los retardadores, dado que son los aditivos que tienen influencia directa sobre el avance de hidratación que es la variable principal en este trabajo.

#### 4.4.1 MECANISMOS DE ACCIÓN DE LOS RETARDADORES<sup>5</sup>.

Los mecanismos con que actúan los retardadores en los cementos portland<sup>5</sup> han sido materia de controversia. Se han propuesto algunas teorías pero no han sido capaces de explicar por completo el proceso de retardación por sí mismo. Se deben considerar dos de los factores principales: por un lado la naturaleza química del retardador y la fase del cemento que actúa sobre el retardador (silicato o aluminato). Principalmente se han propuesto 4 teorías que se resumen a continuación.

1. **Teoría de adsorción:** El efecto retardador se debe a la adsorción del retardador sobre la superficie de los productos de hidratación, por medio de esto se inhibe el contacto con el agua.
2. **Teoría de precipitación:** El retardador reacciona con el calcio y/o los iones hidróxilos en la fase acuosa formando una capa soluble e impermeable alrededor de los granos de cemento.
3. **Teoría de nucleación:** El retardador es absorbido sobre el núcleo de los productos de hidratación contaminando y retardando su futuro crecimiento.
4. **Teoría de complejidad:** El retardador se interpone entre los iones cálcicos evitando la formación del núcleo.

Es probable que todos estos efectos estén involucrados en el proceso retardador.

En la tabla 4-2 se presenta un resumen de los aditivos y mecanismos de acción.

CATEGORIA DEL ADITIVO	BENEFICIO	COMPOSICIÓN QUÍMICA	MECANISMO DE ACCIÓN
Acelerador	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acorta el tiempo de espesamiento.</li> <li>Eleva en forma prematura la resistencia a la compresión.</li> </ul>	CaCl <sub>2</sub> NaCl	Incrementan la permeabilidad de las capas de gel C-S-H
Retardadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alarga el tiempo de espesamiento</li> </ul>	Lignosulfonatos Ácidos hidrocarboxílicos Derivados celulósicos Organofosfonatos Ciertos componentes inorgánicos	Adsorción sobre la capa de gel C-S-H, reduciendo la permeabilidad Prevención de la nucleación y crecimiento de la hidratación de los productos de gelación de los iones de calcio. Precipitación de los sólidos impermeables sobre las capas de gel C-S-H
Extendedores	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menor densidad de la lechada</li> <li>Eleva el punto de cedencia de la lechada</li> </ul>	Bentonita Silicatos de sodio Puzolanas Gilsonita Polvo de carbón Microesferas Nitrógeno	Absorción de agua Formación de gel C-S-H + Absorción de agua Densidad más baja que el cemento Cemento espumado
Aditivos densificantes	Elevan la densidad de la lechada	Barita (BaSO <sub>4</sub> ) Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Ilmenita	Incrementan la densidad del cemento
Dispersantes	Disminuyen la viscosidad de la lechada	Sulfonatos Polinaftalenos Sulfonatos de Polimelaminas Lignosulfonatos Sulfonatos de Poliestireno Polisacaridos Hidroxilados Ácidos hidrocarboxílicos	Inducen la repulsión electrostática de los granos del cemento
Aditivos para pérdidas de filtrado	Reducen la deshidratación de la lechada	Polímeros celulósicos Poliaminas Polímeros Aromáticos Sulfonados Polivinilpirrolidona Alcohol Polivinílico Copolímeros o Terpolímeros AMPS Bentonita Fibras	Incrementan la viscosidad de la fase acuosa de la lechada reduciendo la permeabilidad del enjarre de la lechada  Partículas de puenteo del enjarre del cemento
Aditivos para el control de las pérdidas de circulación	Prevención de pérdidas de la lechada a la formación	Gilsonita Carbón Granular Ojuelas de celofán Cáscaras de nuez Yeso Ciertas sales de sulfato solubles Bentonita Polímeros celulósicos ligados en forma cruzada	Efecto de puenteo a través de la formación  Comportamiento tixotrópico inducido de la lechada
		MICELANEOS	
Aditivos antiespumantes	Reducen la entrada de aire adicional por el mezclado de la lechada	Fibras de nylon Silicones	Insolubles en sistemas espumados Más baja tensión superficial que el sistema espumado
Aditivos para incrementar la resistencia del cemento	Incrementan de golpe la resistencia y/o flexibilizan la resistencia del asentamiento del cemento	Fibras de nylon Caucho natural	Transmite esfuerzos localizados más regularmente a través de la matriz de cemento
Trazadores radioactivos	Facilitan la determinación en sitios exteriores de la tubería de revestimiento	<sup>131</sup> I <sup>132</sup> Ir	Emisión de radioactividad

Tabla 4-12 Resumen de los aditivos y los mecanismos de acción<sup>5</sup>



**CAPITULO 5. REOLOGÍA DE LAS LECHADAS DE CEMENTO.**

Es importante un apropiado entendimiento del perfil reológico en el tiempo de la reología de las lechadas de cemento para su diseño, ejecución y evaluación por múltiples razones incluyendo las siguientes.

- Evaluación del mezclado y bombeo de las lechadas de cemento.
- Determinación de la relación del mezclado y la bombeabilidad de las lechadas.
- Cálculo del gasto de retorno cuando ocurre caída libre.
- Diseño del gasto de desplazamiento requerido para lograr una óptima remoción del lodo.
- El perfil de viscosidades durante la colocación de la lechada.

Este último es el más interesante desde el punto de vista práctico y de investigación que podrá ayudar a mejorar tanto a las operaciones como a las formulaciones de la lechada.

Durante los últimos 50 años de investigación no se ha logrado establecer hasta el momento una completa caracterización de la reología de las lechadas de cemento<sup>7</sup>. Esto se debe a la complejidad de su comportamiento reológico que depende de varios factores tales como:

- El cambio de su estructura en el tiempo
- La relación agua/cemento.
- La relación específica del diámetro y tipo de los granos del cemento.
- La composición química del cemento y la distribución relativa de los componentes en la superficie de los granos.
- La presencia de aditivos.
- Los procedimientos de prueba y mezclado.

ESTOY AQUÍ  
CÓMO ME  
SIENTO

Pero el principal es el cambio de su estructura en el tiempo, es decir considerar en el modelo reológico la reactividad de la lechada y la influencia de las altas presiones en dicha reactividad. Aspecto que modelos reológicos convencionales no consideran.

## 5.1 DEFINICIONES REOLÓGICAS

A continuación describiremos algunos de los principales conceptos reológicos que nos servirán como base, para clasificar a las lechadas de cemento en el contexto de los fluidos y poder alcanzar los objetivos de este trabajo de tesis.

### 5.1.1 REOLOGÍA.

Es la ciencia que se dedica a el estudio de la deformación y el flujo de la materia en respuesta a los esfuerzos aplicados.

*Las ecuaciones que describen el flujo de cualquier fluido son las ecuaciones de conservación de masa, moméntum y energía. Estas no pueden ser resueltas sin suponer una o más ecuaciones constitutivas que relacionen la deformación del fluido (deformaciones) a las fuerzas aplicadas (esfuerzos)<sup>7</sup>. Cada una de estas ecuaciones relaciona el tensor esfuerzo de corte  $\tau$  al tensor velocidad de corte  $\gamma$ . Este trabajo de tesis propone una relación entre  $\tau$  y  $\gamma$  en el tiempo  $t$  de la forma:*

$$\tau = f(t, \gamma)$$

para diferentes niveles de presión a temperatura promedio de la región sur del país.

### 5.1.2 FLUJO.

Es la capacidad que tienen los fluidos para el movimiento o la deformación irreversible que sufren las partículas de este por unidad de área, debido al deslizamiento continuo provocado por un esfuerzo externo, en la cual el trabajo empleado para mantener el flujo es disipado mediante calor y no es mecánicamente recuperable.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.1.3 DEFORMACIÓN.

Es el desplazamiento angular que sufren las partículas de un fluido que esta sometido a un esfuerzo y se puede dividir en forma general en dos tipos: elasticidad y flujo.

### 5.1.4 ELASTICIDAD.

Es la deformación correspondiente a una energía mecánicamente recuperable cuando el cuerpo retorna a su forma original.

### 5.1.5 FLUIDO.

Sustancia que fluye bajo el efecto de un esfuerzo sin importar la consistencia de este, en el cual los esfuerzos entre las partículas adyacentes son proporcionales y tienden a desaparecer cuando cesa el movimiento.



### 5.1.6 ESFUERZO DE CORTE.

Es el esfuerzo que provoca en el fluido una deformación laminar en la cual los planos paralelos infinitamente delgados se deslizan uno sobre otro como si fuera un paquete de naipes.

### 5.1.7 VELOCIDAD DE CORTE.

Es la relación entre la velocidad del fluido y la distancia entre las superficies que los separa y se mide en  $s^{-1}$ .

### 5.1.8 MEZCLAS.

Son sistemas de composición variable que contienen dos o más componentes en los cuales su proporción no permanece fija, es decir la cantidad de los constituyentes puede cambiar pero la naturaleza del sistema se conserva. Si la mezcla presenta una sola fase o estado de agregación se clasifica como *homogénea* y es *heterogénea* si muestra dos o más fases, las fases pueden ser de carácter sólido, líquido o gaseoso. Las mezclas se constituyen de la fase dispersora que mantiene mayor proporción y la fase dispersante que mantiene menor proporción.

### 5.1.9 MEZCLAS MULTIFÁSICAS.

Pueden ser descritas de acuerdo con las condiciones reales de flujo y la distribución de cada una de las fases y se pueden dividir en dispersiones finas, dispersiones gruesas macromezclas y estratificadas.

#### 5.1.10 DISPERSIÓN FINA.

Pequeñas burbujas de gas, gotas de líquidos inmiscibles o partículas sólidas uniformemente dispersas en una fase líquida continua o bien partículas sólidas o gotas de líquidos uniformemente distribuidas en una fase gaseosa continua.

#### 5.1.11 SUSTANCIA PURA.

Son sistemas de composición constante en los cuales la proporción de sus componentes se mantiene fija, desde este punto de vista la materia se presenta de forma pura.

#### 5.1.12 SOLES O SUSPENSIOIDES.

Pueden ser de dos tipos liófilos o liófobos, los liófobos son aquellos en los cuales hay poca atracción entre la fase dispersa y la dispersora, y los liófilos en los que existe una gran afinidad entre la fase dispersa y la dispersora, esto provoca una gran solvatación de las partículas coloidales, es decir una mayor área de contacto del solvente.

#### 5.1.13 GELES.

Son dispersiones coloidales de líquido en sólido, su fase dispersa esta constituida por dimensiones que fluctúan entre 1 a 200  $\mu$  (10 a 1000 angstrom  $\text{Å}$ ). En condiciones de equilibrio, las partículas coloidales no sedimentan con facilidad por efecto de la gravedad. Presentan propiedades de floculación precipitación o coagulación, en presencia de aniones o cationes, sus partículas presentan carga eléctrica del mismo signo lo cual impide que se unan.

En la Figura 5-1 se presenta un diagrama de la clasificación de las mezclas, en donde podemos clasificar a las lechadas de cemento como una mezcla compleja, la cual modifica sus características morfológicas dependiendo del tiempo de reacción.

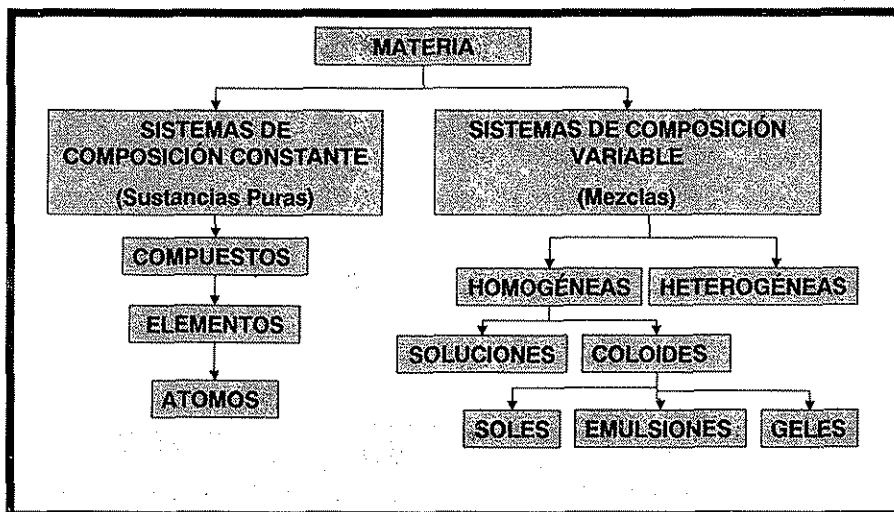


Figura 5-1 Diagrama de clasificación de sustancias puras y mezclas de la materia.

## 5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS<sup>7</sup>.

Los fluidos se clasifican de acuerdo con su comportamiento bajo la acción de un esfuerzo cortante y a la velocidad de corte inducida por dicho esfuerzo<sup>10</sup>, en Newtonianos y No-Newtonianos (Tabla 5-1).

FLUIDOS VISCOSOS		
NO NEWTONIANOS		NEWTONIANOS
DEPENDIENTES DEL TIEMPO	INDEPENDIENTES DEL TIEMPO	SUSTANCIAS PURAS
TIXOTRÓPICOS	PLÁSTICOS DE BINGHAM	HOMOGÉNEAS
REOPÉCTICOS	SEUDOPLÁSTICOS	HETEROGÉNEAS
VISCOELÁSTICOS	DILATANTES	COMPLEJAS
FLUJOS REACTIVOS	SEUDOPLÁSTICOS	
COMBINACIONES DE LOS ANTERIORES	SEUDOPLÁSTICOS Y DILATANTES CON PUNTO DE CEDENCIA	

Tabla 5-1 Clasificación de fluidos

A partir de estas clasificaciones podemos ver a las lechadas de cemento como fluidos No-Newtonianos constituidos por mezclas complejas de dispersión fina, en las cuales se realiza un proceso de reacción química de hidratación que va creando una gel

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

arcillosa, que durante el proceso de hidratación va formando puentes que ligan los diferentes cristales de los que esta compuesto el cemento, y crea una estructura en la que ocurre un proceso de gelificación que depende de variables tales como el tiempo, presión, temperatura, composición del cemento, aditivos mezclados y se comporta como un fluido no newtoniano dependiente del tiempo.

Todos estos modelos combinan el concepto de Punto de cedencia  $\tau_y$  con el comportamiento de adelgazamiento correspondiente a la velocidad de corte  $\dot{\gamma}$ , representado por una variedad de la relación de ley de potencias. En la tabla 5-2 se presentan algunos ejemplos de diferentes tipos de fluido Newtonianos y No-Newtonianos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FLUIDO	EJEMPLOS
Newtoniano	Agua, aceite, diesel, glicerina y gases
<i>No-Newtoniano independiente del tiempo</i>	
Plástico de Bingham	Grasas, masa, arcilla para moldear, salsa de tomate, fluidos bentoníticos
Seudoplástico	Soluciones poliméricas, fluidos base agua
Dilatante	Almidón soluciones de mica
<i>No-Newtoniano dependiente del tiempo</i>	
Tixotrópico	Lodos de perforación, lechadas de cemento, pinturas.
Reopéctico	Grasas, suspensiones de yeso
Viscoelástico	Fluidos de perforación, polímeros de cadena larga.

Tabla 5-2 Ejemplos de diferentes tipos de fluidos

### 5.3. MODELOS REOLÓGICOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO.

Los modelos reológicos independientes del tiempo han sido ampliamente usados como una aproximación al comportamiento reológico de las lechadas de cemento. Sin embargo dichos modelos solo tienen capacidad predictiva en un tiempo  $t = 0$ , donde el cemento no ha reaccionado con el agua. A continuación se da una breve presentación de estos modelos. Los modelos reológicos son expresiones matemáticas para el esfuerzo de corte o la viscosidad en función de la velocidad de corte.

**5.3.1 MODELO DE NEWTON<sup>6,8</sup>.**

Este modelo representa a los fluidos ideales, la relación entre el esfuerzo y la velocidad de corte es lineal y la constante de proporcionalidad se conoce como viscosidad. Esta viscosidad permanece constante a cualquier velocidad de corte siempre y cuando el flujo sea laminar y las propiedades del fluido permanezcan inalterables. Matemáticamente se expresa de la siguiente forma<sup>8</sup>.

$$\tau = \mu\gamma \dots (5-1)$$

donde:

$\tau$  = Es el esfuerzo cortante [ $F/L^2$ ]

$\mu$  = Viscosidad absoluta o newtoniana [ $M/LT$ ]

$\gamma$  = Velocidad de corte [ $1/T$ ]

**5.3.2 MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM<sup>6,8</sup>**

Es el modelo más simple de los fluidos no-Newtonianos, la relación entre el esfuerzo y la velocidad de corte exhibe una proporcionalidad directa, a partir de que se excede un esfuerzo inicial finito necesario para iniciar el movimiento del fluido. A este esfuerzo inicial se le denomina punto de cedencia  $\tau_0$ , en tanto que la pendiente de la porción lineal del reograma se conoce como viscosidad plástica  $\mu_p$ . Matemáticamente esta representado por la siguiente ecuación.

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \dots (5-2)$$

donde:

El fluido esta estático cuando  $\gamma = 0$  si  $\tau \leq \tau_0$

El fluido esta en movimiento cuando  $\gamma \neq 0$  si  $\tau > \tau_0$

$\tau_0$  = es el esfuerzo mínimo para poner el fluido en movimiento, conocido como punto de cedencia y sus unidades son  $lb/100 \text{ pie}^2$ .

$\mu_p$  = Es conocida como la viscosidad plástica y es la relación que existe entre el incremento del esfuerzo de corte y la correspondiente velocidad de corte, en otras

palabras es la inclinación de la curva esfuerzo contra velocidad de corte y su unidad es el centipoise.

### 5.3.3 MODELO DE OSTWALD-DE WALE O LEY DE POTENCIAS<sup>6,8</sup>.

Es uno de los más usados en el campo de la ingeniería y su relación entre el esfuerzo y la velocidad de corte se caracteriza por dos constantes, su relación matemática se expresa de la siguiente forma.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \dots (5-3)$$

donde:

**K** = Índice de consistencia y es un término semejante a la viscosidad e indicativo de la consistencia del fluido, es decir si el valor de K es alto el fluido es más viscoso y viceversa.

**n** = Es el índice de comportamiento de flujo y es una medida del grado de desviación del comportamiento newtoniano del fluido. Entre más alejado de la unidad este el fluido, más no-Newtoniano es el carácter del fluido. Para  $n < 1$  el fluido se adelgaza o se hace menos viscoso, y su comportamiento es seudoplástico. Para  $n = 1$  es un fluido Newtoniano y para  $n > 1$  el comportamiento del fluido es dilatante.

### 5.3.4 MODELO DE EYRING.

Este modelo deriva de la teoría cinética de los líquidos de Eyring<sup>7</sup>, que hasta ahora es fundamentalmente empírico, ya que la teoría de los líquidos se ha desarrollado tan solo en forma parcial, no obstante permite estimar la viscosidad a partir de otras propiedades físicas. El modelo de Eyring predice el comportamiento seudoplástico para valores finitos de  $\tau$ .

No obstante que es un modelo eminentemente empírico reproduce adecuadamente el comportamiento de flujo de muchos fluidos seudoplásticos y dilatantes con excelentes resultados. El  $\tau$  tiende asintóticamente a la ley de viscosidad de Newton cuando  $\tau$  tiende a cero, siendo en este caso  $\mu = A/B$ . Es un modelo cuyo comportamiento es



intermedio entre el modelo de ley de potencias y el modelo de Newton. Matemáticamente se expresa con la siguiente ecuación.

$$\tau = A \operatorname{arcsen} h \left( - \frac{1}{B} \gamma \right) \dots (5-4)$$

**A** y **B** son parámetros que se derivan de la teoría cinética de los líquidos. Esta ecuación es válida solo para rangos estrechos de velocidades de corte.

**arcsen***h* = el ángulo del seno hiperbólico, es una función trigonométrica.

### 5.3.5 MODELO DE CASSON.

El modelo de Casson<sup>7</sup> fue desarrollado para el estudio reológico de sistemas heterogéneos, el cual es empleado en la industria del plástico, pinturas, etc. Ha sido aplicado en los fluidos de perforación, debido a que las viscosidades a velocidades de corte elevadas, pueden ser obtenidas o extrapoladas en el campo, utilizando solamente datos a velocidades de corte bajas e intermedias.

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_y} + \sqrt{\mu_\infty} \sqrt{\gamma} \dots (5-5)$$

donde:

$\tau_y$  = Punto de cedencia.

$\gamma$  = velocidad de corte.

$\mu_p$  = viscosidad plástica.

### 5.3.6 MODELO DE (PARZONKA Y VOCADLO)<sup>5</sup>.

$$\sqrt{\tau} = \left[ \sqrt{\tau_y^n} + k^n \sqrt{\tau} \right]^n \dots (5-6)$$

donde:

**K** = índice de consistencia.

**n** = es el índice de comportamiento de flujo.

**5.3.7 MODELO DE HERSCHEL-BUKLEY O LEY DE POTENCIAS MODIFICADO<sup>7</sup>.**

$$\tau = \tau_Y + K\gamma^n \dots(5-7)$$

donde:

**K** = índice de consistencia.

**n** = es el índice de comportamiento de flujo.

**5.3.8 MODELO DE ROBERTSON Y STIFF<sup>7</sup>.**

$$\tau = A\{\gamma + C\}^B \dots(5-8)$$

Donde: A y B son similares a K y n, **C** es un factor de corrección de la velocidad de corte.

**5.3.9 MODELO DE SSKO<sup>7</sup>.**

$$\tau = A\gamma + B\gamma^n \dots(5-9)$$

Donde: A y B son las constantes reológicas del fluido y tienen un significado similar a la viscosidad.

En la Figura 5-2 se muestra un resumen de los modelos reológicos independientes del tiempo, las diferentes relaciones funcionales entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, donde se puede observar su curva de comportamiento y las variables que caracterizan a los modelos de Newton, Plástico de Bingham, Ley de Potencias, Eyring, Herschel-Bukley, Ellis, Reiner-Phillippopff y Sisko. Sin embargo dada la compleja naturaleza de las lechadas de cemento es necesario contar con modelos que contemplen otras variables que afectan el comportamiento de las lechadas tales como el tiempo, presión y temperatura.

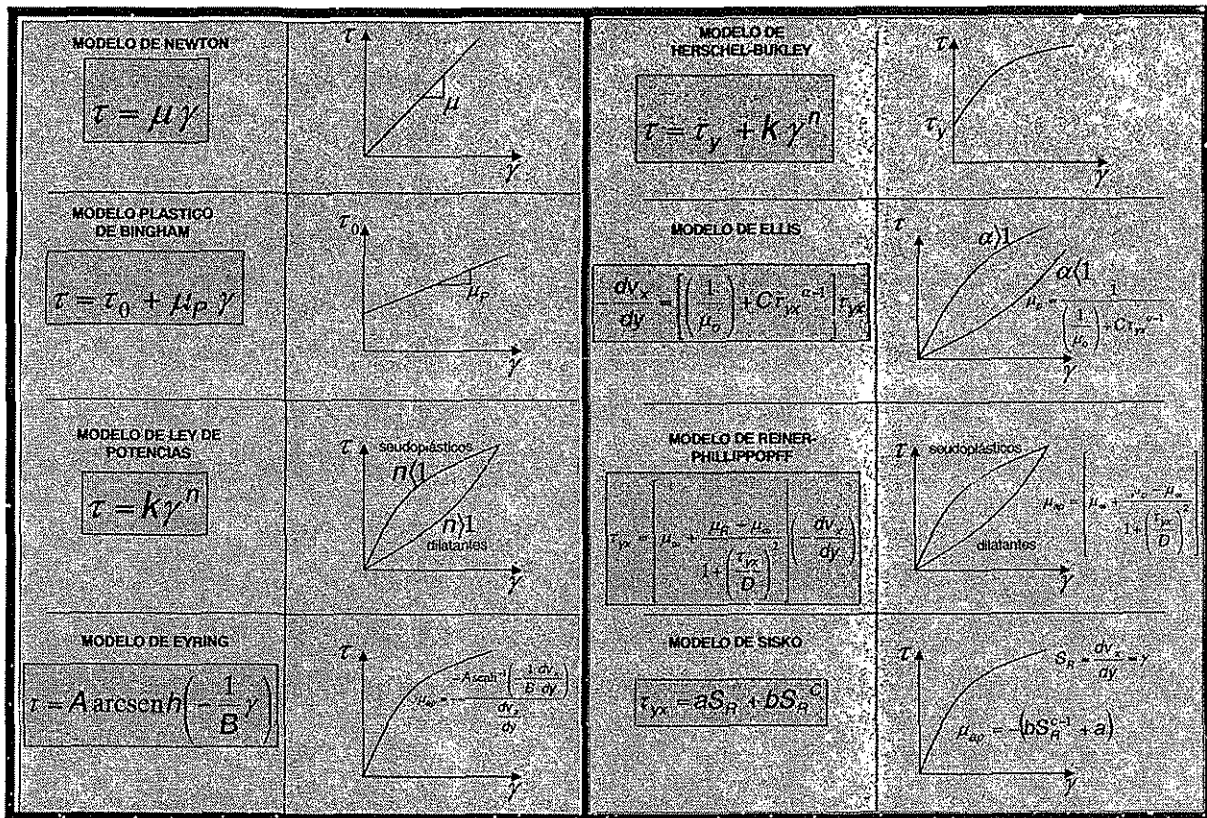


Figura 5-2 Resumen de los modelos reológicos independientes del tiempo

### 5.4 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEPENDIENTE DEL TIEMPO.

Las propiedades reológicas de las lechadas de cemento no dependen de la velocidad de corte únicamente, sino que además también dependen del tiempo. Esto ocurre 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. A cada uno de los materiales le corresponde una estructura de equilibrio y un esfuerzo de corte asociado con cualquier velocidad particular de corte. El equilibrio solo puede ser alcanzado para un determinado tiempo. Para alcanzar este equilibrio se construye o destruye progresivamente la estructura, dependiendo del ambiente previamente aplicado a la velocidad de corte que puede ser más alto o más bajo dependiendo del gasto de bombeo.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

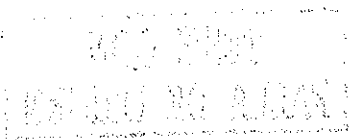
Este fenómeno se encuentra asociado con un incremento o disminución del esfuerzo de corte hasta alcanzar un valor asintótico, es dependiente del tiempo y se conoce como *tixotropía*. En los fluidos tixotrópicos los procesos son frecuentemente reversibles. Rara vez y este es el caso de las lechadas de cemento hay un segundo factor en que la estructura del fluido depende del tiempo y estos son las continuas reacciones químicas que modifican las propiedades de la lechada con el tiempo de una manera irreversible. Sin embargo la situación se simplifica algo durante el periodo de inducción, particularmente para lechadas de cemento con retardador, donde cualquier dependencia del tiempo esta dominada por los efectos tixotrópicos (solo en esta etapa).

La viscosidad de los fluidos no-Newtonianos dependientes del tiempo, puede aumentar o disminuir con el tiempo, aún cuando la velocidad de corte se mantenga constante. El comportamiento de estos fluidos es función de la historia de esfuerzos y el tiempo de deformación.

Se conocen también como fluidos de Boltzman, existen dos tipos generales: fluidos tixotrópicos y fluidos reopécticos. Para estos fluidos el esfuerzo de corte es una función multivaluada de la velocidad de corte.

#### 5.4.1 FLUIDOS TIXOTRÓPICOS.

Son aquellos cuya viscosidad disminuye con la duración del esfuerzo cortante aplicado, aún cuando la velocidad de corte se mantenga constante Este comportamiento se ha atribuido al hecho de que la viscosidad es función parcial de estructuras inter e intramoleculares, las cuales requieren de algún tiempo para ser construidas o destruidas. En los fluidos tixotrópicos se presenta un adelgazamiento con la velocidad de corte, pero en función del tiempo son sensibles a la historia de deformación. En los fluidos tixotrópicos dependientes del tiempo la viscosidad aparente  $\mu_{ap}$  disminuye con el tiempo de agitación.



### 5.4.2 FLUIDOS REOPÉCTICOS.

Son aquellos fluidos que presentan un incremento en su viscosidad aparente con el tiempo de deformación, aún cuando la velocidad de corte se mantenga constante. Este tipo de comportamiento no es usual en los fluidos reales y cuando llega a presentarse ocurre sobre un rango estrecho de velocidades de corte. Ejemplos de materiales reopécticos: Suspensiones de yeso en agua, soluciones de bentonita y soluciones de pentóxido de Vanadio.

Cuando el esfuerzo actuante sobre el fluido tixotrópico o reopéctico se suprime la estructura interna de la sustancia se reforma gradualmente produciéndose un incremento o decremento de la viscosidad del fluido, según sea el caso. Esta reversibilidad origina un fenómeno de histéresis que se usa para medir la tixotropía del material en cuestión.

Una explicación acerca del comportamiento reológico de las lechadas de cemento es extremadamente complejo y los modelos descritos anteriormente solo describen el comportamiento de las condiciones de flujo bajo rangos limitados. Por lo tanto para intentar caracterizar las propiedades reológicas de una lechada de cemento, es indispensable tener una idea de la velocidad de deformación a que esta sometida la lechada mientras se coloca en el agujero. Los modelos sufren limitaciones porque no consideran el cambio irreversible de la estructura molecular por reacción química.

Hasta ahora las lechadas de cemento solo se habían caracterizado con los viscosímetros rotacionales estándar sin tomar en cuenta la dependencia de la temperatura y presión. La falta de equipo es otra de las razones por las que no se ha caracterizado las lechadas de cemento en función de la presión y la temperatura. La viscosidad de los sólidos en suspensión se incrementa conforme se agita y exponencialmente con la fracción de volumen sólido, tiene una tendencia de aproximación al infinito al acercarse al empaquetamiento. Por lo tanto la viscosidad se incrementará sensiblemente conforme la presión aumenta. Por otro lado la temperatura tiene un efecto catalítico sobre la reacción de hidratación y por consecuencia afecta en forma drástica la reología de las lechadas de cemento.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO 6. PRUEBAS DE CONSISTENCIA Y ESPESAMIENTO DE LAS LECHADAS

Para el análisis del comportamiento de las lechadas de cemento a la presión y temperatura de los pozos de la Región Sur del País, se desarrollaron dos tipos de pruebas experimentales:

- Pruebas de las lechadas de cemento con un consistómetro para alta presión y temperatura marca Chandler Modelo 8-25, en el cual se determinó el comportamiento de la consistencia y el espesamiento de las lechadas de cemento.
- Pruebas reológicas de las lechadas de cemento con un viscosímetro FANN 70 para alta presión y temperatura.

Los dos tipos de pruebas se realizaron en el laboratorio de Perforación del Instituto Mexicano del Petróleo en la Cd. de México.

En este capítulo se describe el desarrollo de las pruebas con el consistómetro, así como las consideraciones que se tomaron para simular las condiciones de presión y temperatura representativas de los pozos de la Región Sur. Se presentan también los resultados experimentales y su interpretación.

### 6.1. CONSIDERACIONES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA.

Para realizar las pruebas con el consistómetro de alta presión y temperatura, se investigaron la presión y temperatura de los pozos de la Región Sur<sup>12</sup> del país considerando el siguiente división por zona para obtener el espacio muestral.

1. Bellota-Chinchorro.
2. Chilapilla-José Colomo.
3. Cinco Presidentes.
4. Jujo-Tecominoacan.
5. Luna.
6. Muspac.
7. Samaria-Sitio Grande.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

se obtuvo la presión y temperatura a la profundidad promedio de asentamiento de las tuberías de explotación de 7" y 5" en los pozos de la región sur quedando como sigue:

- Temperatura :148°C.
- Profundidad: 5,342 m.

Dado que existen cédulas para el desarrollo de las pruebas con el consistómetro, publicadas por el API de acuerdo a la Norma RP 10-A del API<sup>4</sup> "Materials and Testing for Well Cements" se eligió la cédula que más se ajustaba a los datos obtenidos en la investigación sobre los pozos de la Región Sur para realizar las pruebas con el consistómetro. El número de cédula que más se acercó a estas características fue la cédula 31<sup>9</sup> para una profundidad de 5,490 m, una temperatura estática de 157°C y una presión máxima de 18,800 psi, la cual cubre el rango de presión y temperatura de todas las probables operaciones que se puedan efectuar en el pozo a esta profundidad.

Así mismo se buscó una cédula para baja presión y temperatura como referencia de comparación con la anterior para un pozo de 2,500 m eligiendo la cédula No. 5, las cuales fueron obtenidas de la norma RP-10B del API "Specification for Cements and Materials for Well Cementing" Los datos de estas dos cédulas se presentan en la Tabla 6-1, en donde se puede observar que ya viene realizado el ajuste que considera la diferencia entre la temperatura estática y la temperatura dinámica que es la que realmente se presenta cuando se esta circulando en el pozo.

La cédula 31 representa el promedio de las condiciones de presión y temperatura de la Región Sur y la cédula 5 nos servirá de comparación para determinar el comportamiento de la lechada a bajas condiciones de presión y temperatura. Se realizaron pruebas con cemento solo y con retardador para determinar los límites del efecto del retardador de acuerdo a su porcentaje en peso de cemento hasta alcanzar las presiones y temperaturas de la cédula 31.

En la Tabla 6-1 se presentan los valores de presión y temperatura seguidos por las pruebas realizadas con el consistómetro, donde se puede observar que la temperatura estática es diferente a la temperatura dinámica y esta corregida por el efecto de circulación.

Cédula 31 Profundidad 5490 m Temperatura estática 157 °C			Cédula 5 Profundidad 2500 m Temperatura estática 57°C.		
Tiempo de Calentamiento (min)	Presión (psi)	Temperatura (°C)	Tiempo de Calentamiento (min)	Presión (psi)	Temperatura (°C)
0	2000	27	0	1000	27
2	2900	32	2	1300	28
4	3700	38	4	1600	30
6	4600	43	6	1900	32
8	5400	49	8	2200	34
10	6300	55	10	2500	36
12	7200	61	12	2800	37
14	8000	66	14	3100	39
16	8900	72	16	3400	41
18	9800	77	18	3700	43
20	10600	83	20	4000	44
22	11500	88	22	4300	46
24	12300	94	24	4600	48
26	13200	99	26	4900	50
28	14100	105	28	5160	52
30	14900	111			
32	15800	117			
34	16600	122			
36	17500	128			
38	18400	133			
39	18800	136			

Tabla 6-1. Cédulas 31 y 5 de las especificaciones 10-A del API de cementos y materiales para la cementación de pozos, a una profundidad de 5,490 y 2,500 m.

## 6.2. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS DE CONSISTENCIA Y TIEMPO DE ESPESAMIENTO.

Las lechadas para las pruebas de consistencia se prepararon siguiendo el procedimiento de la misma norma (RP 10-A del API "Materials and Testing for Well Cements"). Las lechadas para las pruebas se prepararon todas con una misma cantidad de agua y cemento haciendo variar solo la cantidad y tipo de retardador para alcanzar los límites máximos de presión y temperatura determinados por la cédula No. 31 de alta presión y la cédula No. 5 de baja presión. Las lechadas se prepararon usando 860 g de cemento tipo "H" y 327 g de agua destilada. Se realizaron pruebas con cemento solo y con diferentes concentraciones de retardador. Se determinó



experimentalmente los límites del efecto del retardador de acuerdo a su porcentaje en peso de cemento hasta alcanzar las presiones y temperaturas de la cédulas.

La mezcla se realizó de acuerdo al procedimiento API y se procedió a realizar las pruebas con el consistómetro Chandler Modelo 8-25 para alta presión y temperatura, descrito en el capítulo 2 Figura 2-1. Las primeras nueve pruebas se realizaron para determinar el tiempo máximo de espesamiento y el efecto del retardador al someter la lechada a altas presiones y temperaturas variando la concentración del retardador.

Como se mencionó en el Capítulo 4 para la cementación existe una gran cantidad de retardadores cuyos mecanismos de acción aún están en discusión, inicialmente se probó con un lignosulfonato tipo HR-L4 para determinar en que concentraciones se lograba alcanzar la temperatura de 136°C y la presión de 18,800 lb/pg<sup>2</sup>, sin embargo al realizar las pruebas con el consistómetro se observó que aún cuando se alcanzaron las condiciones de la cédula 31 los tiempos máximos de espesamiento no dieron el margen de tiempo suficiente para poder realizar las pruebas reológicas. A continuación se muestra una tabla con los resultados de las ocho pruebas realizadas con este lignosulfonato para determinar el tiempo máximo de espesamiento.

NO. DE PRUEBA	TIEMPO MÁXIMO DE ESPESAMIENTO (min)	CANTIDAD DE RETARDADOR (g)
1	30	CEMENTO SOLO
2	31	0.5
3	32	1
4	36	1.5
5	37	2
6	38	2.5
7	39	3
8	41	4

**Tabla 6-2 Efecto de un lignosulfonato sobre el tiempo máximo de espesamiento de una lechada de cemento a 136°C y 18,800 lb/pg<sup>2</sup>**

Con los resultados de estas pruebas se consultó a la sección de cementaciones de Petróleos Mexicanos de Poza Rica para obtener un aditivo más estable a altas temperaturas, de esta consulta se nos proporcionó una tabla donde los aditivos retardadores se clasifican como reactivos químicos que extienden el tiempo bombeable y el tiempo de espesamiento de las lechadas de cemento de acuerdo a un código "CR", en la Tabla 6-3 se pueden observar las características de estos aditivos retardadores que actualmente se usan en las cementaciones de Petróleos Mexicanos.

No. DE RETARDADOR	CARACTERÍSTICAS
1	POLVO RETARDADOR ORGANICO ALTAMENTE REFINADO PARA BAJAS TEMPERATURAS, MEDIANAMENTE DISPERSIVO PARA TEMPERATURAS DE 100 A 200 °F.
2	POLVO RETARDADOR ORGANICO PREMIUM REFINADO PARA BAJAS TEMPERATURAS, MEDIANAMENTE DISPERSIVO PARA TEMPERATURAS ENTRE 100 Y 200.°F.
3	LIQUIDO RETARDADOR ORGANICO SOLUCIÓN PREMIUM, MEDIANAMENTE DISPERSIVO PARA TEMPERATURAS DE 100 A 220 °F.
4	POLVO RETARDADOR ORGANICO PREMIUM REFINADO PARA BAJAS TEMPERATURAS, MEDIANAMENTE DISPERSIVO PARA 100 A 250 °F.
5	POLVO ORGANICO RETARDADOR PARA MEDIANA TEMPERATURA, VISCOSIFICA DE 100 A 250 °F.
6	POLVO ORGANICO RETARDADOR PARA ALTO GEL Y BAJA TEMPERATURA, APLICABLE EN SISTEMAS DE BAJA DENSIDAD, ÓPTIMA ENTRE 100 Y 200 °F.
7	POLVO ORGANICO INTENSIFICADOR DE RETARDADOR PARA ALTAS TEMPERATURAS, DISPERSIVO EFECTIVO PARA TEMPERATURAS DE MÁS DE 400 °F.
8	POLVO ORGANICO INTENSIFICADOR DE RETARDADOR PARA ALTAS TEMPERATURAS, DISPERSIVO, EFECTIVO A TEMPERATURAS DE MÁS DE 400 °F.
9	POLVO MEZCLA ORGANICA DE DOS COMPONENTES PARA ALTAS TEMPERATURAS, MEDIANAMENTE DISPERSIVO, EFECTIVO HASTA TEMPERATURAS DE 450 °F.
10	LIQUIDO SOLUCIÓN ORGANICA DE 3 COMPONENTES PARA ALTAS TEMPERATURAS, MEDIANAMENTE DISPERSIVO, ALTAMENTE EFECTIVO A TEMPERATURAS DE MÁS DE 450 °F.

**Tabla 6-3 Clasificación de retardadores químicos que extienden el tiempo bombeable y el tiempo de espesamiento de las lechadas de cemento**

Para poder alcanzar la temperatura de 136°C, la presión de 18,800 lb/pg<sup>2</sup> de la cédula 31 y además extender el tiempo máximo de espesamiento de las lechadas, que reproducen las condiciones promedio de los pozos de la Región Sur de Petróleos Mexicanos y efectuar las pruebas reológicas, se realizaron las pruebas con el

consistómetro utilizando el aditivo retardador No. 9 de la Tabla 6-3 que corresponde a un polvo, mezcla orgánica de dos componentes para altas temperaturas, medianamente dispersivo, efectivo hasta temperaturas de 450 °F.

A continuación se presentan las tablas de los resultados de las pruebas efectuadas con el consistómetro Chandler para alta presión y temperatura.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 6.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS DE CONSISTENCIA.

PRUEBA No. 1 SIN RETARDADOR							
CEDULA 5 BAJA PRESIÓN Y TEMPERATURA							
Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión	Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión
min	Uc	(°C)	(psi)	min	Uc	(°C)	(psi)
0	40	27	1000	64	58	53	5100
2	40	28	13000	65	58	53	5100
3	40	30	1600	65.5	58	53	6000
4	40	32	1900	66	60	53	6000
5	40	34	2200	66.5	60	53	6000
6	40	36	2500	67	60	53	6000
10	40	37	2800	67.5	60	53	6000
13	40	39	3100	68	65	53	6000
16	40	41	3400	69	65	53	6000
18	40	43	3700	69.5	65	53	6000
20	40	44	4000	69.75	65	53	6000
22	40	46	4300	70	65	53	6000
24	40	48	4600	70.5	65	53	6000
26	40	50	4900	71	65	53	6000
28	40	52	5160	72	65	53	6000
30	40	53	5200	74	65	53	6000
32	40	53	5500	76	65	53	6000
34	45	53	5500	78	68	53	6000
36	45	53	6000	80	70	53	6000
38	45	52	5500	82	75	53	6000
40	45	52	5500	84	78	53	6000
42	45	53	6000	86	80	53	6000
44	48	53	5500	88	82	53	6000
46	48	53	5500	90	82	53	6000
48	48	53	5500	92	88	53	6000
50	50	53	5500	94	88	53	6000
52	50	53	5600	96	90	53	6000
54	50	53	5600	98	95	53	5500
56	50	53	5600	100	95	53	5800
58	55	53	6000	102	98	53	5800
60	55	53	6000	104	100	53	6000
62	56	53	6000				

Tabla No. 6-4 Prueba No.1 consistencia de una lechada de cemento, temperatura máxima de 53°C y presión máxima de 6000 lb/pg<sup>2</sup>, tiempo máximo de espesamiento de 104 minutos.

<b>PRUEBA No. 2 SIN RETARDADOR</b>			
<b>CEDULA 31 ALTA PRESIÓN Y TEMPERATURA</b>			
Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión
min	Uc	(°C)	(psi)
0	35	27	2000
2	35	32	2900
5	35	38	3700
9	35	43	4600
11	35	49	5400
12	35	55	6300
14	35	61	7200
16	35	66	8000
18	35	72	8400
20	40	77	10600
22	45	83	11500
24	45	88	12300
26	45	94	13200
28	50	99	14100
29	70	95	14900
30	100	111	15000

Tabla No. 6-5 Prueba No.2 consistencia de una lechada de cemento a una temperatura máxima de 111°C y una presión máxima de 15,000 lb/pg<sup>2</sup>, tiempo máximo de espesamiento 30 minutos.

ESTADO DE GUATEMALA  
 INSTITUTO NACIONAL DE CALIDAD  
 (MARCA DE AGUJA)

PRUEBA No. 3 CON 2 g DE RETARDADOR							
CEDULA 31 ALTA PRESION Y TEMPERATURA							
Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión	Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión
min	Uc	(°C)	(psi)	min	Uc	(°C)	(psi)
0	20	28	2000	40	20	136	18800
2	20	32	2900	42	20	131	18800
3	20	38	3700	44	20	133	18000
4	20	43	4600	46	20	135	18800
5	20	49	5400	48	20	136	19500
6	20	55	6300	50	20	137	19500
10	20	61	7200	52	20	137	19500
13	20	66	8000	54	20	137	19500
16	20	72	8900	56	20	137	19500
18	20	77	9800	58	25	137	19500
20	20	83	10600	60	25	137	19500
22	20	88	11500	62	30	138	19500
24	20	94	12300	64	40	138	19500
26	20	99	13200	65	50	138	19500
28	20	105	14100	65.5	60	138	19500
30	20	111	14900	66	70	138	19500
32	20	117	15800	66.5	80	138	19500
34	20	122	16600	67	90	138	19500
36	20	128	17500	67.5	100	138	19500
38	20	133	18400				

Tabla No. 6-6 Prueba No. 3 consistencia de una lechada de cemento a una temperatura máxima de 138°C y una presión máxima de 19,500 lb/pg<sup>2</sup>, tiempo máximo de espesamiento 67.5 minutos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<b>PRUEBA N.º. 4 CON 2 g DE RETARDADOR</b>							
<b>ALTA TEMPERATURA = 136°C Y PRESIÓN DE 12,300 psi</b>							
Tiempo min	Consistencia Uc	Temperatura (°C)	Presión (psi)	Tiempo min	Consistencia Uc	Temperatura (°C)	Presión (psi)
0	20	27	2000	46	16	132	12300
2	20	32	2700	48	16	135	12300
3	20	38	3700	50	16	136	12300
4	20	43	4600	52	16	137	12300
5	15	49	5400	54	16	138	12300
6	15	55	6300	56	18	140	12300
10	15	61	7200	58	20	138	12300
13	16	66	8000	60	22	137	12300
16	15	72	8900	62	22	137	12300
18	20	77	9800	64	26	137	12300
20	20	83	10600	65	26	137	12300
22	15	88	11500	65.5	26	137	12300
24	14	94	12300	66	28	137	12300
26	14	99	12300	66.5	28	137	12300
28	14	105	12300	67	28	137	12300
30	14	111	12300	67.5	28	137	12300
32	18	117	12300	68	40	139	12300
34	20	122	12300	69	60	138	12300
36	22	128	12300	69.5	70	138	12300
38	26	133	12300	69.75	80	138	12300
40	32	130	12300	70	90	138	12300
42	20	128	12300	70.5	95	138	12300
44	18	129	12300	71	100	138	12300

Tabla No. 6-7 Prueba No. 4 consistencia de una lechada de cemento con 2 g de retardador, temperatura máxima de 138°C y presión máxima de 12,300 lb/pg<sup>2</sup>, tiempo máximo de espesamiento 71 minutos.

<b>PRUEBA No. 5 CON 2 g DE RETARDADOR</b>											
<b>ALTA TEMPERATURA = 136°C Y PRESION DE 6300 psi</b>											
Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión	Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión	Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión
min	Uc	(°C)	(psi)	min	Uc	(°C)	(psi)	min	Uc	(°C)	(psi)
0	20	27	2000	65	15	137	6300	112	14	137	6300
2	20	32	2900	65.5	15	137	6300	114	14	137	6300
3	15	38	3700	66	14	137	6300	116	15	137	6300
4	15	43	4600	66.5	14	137	6300	118	15	137	6300
5	16	49	5400	67	14	137	6300	120	18	136	6300
6	15	55	6300	67.5	14	137	6300	122	20	136	6300
10	14	61	6300	68	14	137	6300	124	20	137	6300
13	14	66	6300	69	14	137	6300	126	22	137	6300
16	14	72	6300	69.5	14	137	6300	128	28	139	6300
18	14	77	6300	69.75	14	137	6300	130	28	138	6300
20	14	83	6300	70	14	137	6300	132	30	137	6300
22	15	88	6300	70.5	14	137	6300	134	30	137	6300
24	15	94	6300	71	14	137	6300	136	30	136	6300
26	15	99	6300	72	14	137	6300	138	32	137	6300
28	16	105	6300	74	14	137	6300	140	32	136	6300
30	16	111	6300	76	14	137	6300	141	32	137	6300
32	18	117	6300	78	14	137	6300	141.5	32	137	6300
34	18	122	6300	80	14	137	6300	141.75	32	137	6300
36	20	128	6300	82	14	137	6300	142	32	137	6300
38	20	133	6300	84	14	137	6300	144	32	136	6300
40	22	131	6300	86	14	137	6300	146	32	137	6300
42	15	127	6300	88	14	137	6300	148	34	137	6300
44	16	128	6300	90	14	137	6300	150	40	137	6300
46	20	131	6300	92	14	137	6300	152	50	137	6300
48	20	147	6300	94	14	137	6300	153	66	137	6300
50	16	141	6300	96	14	137	6300	154	75	137	6300
52	16	136	6300	98	14	137	6300	155	80	137	6300
54	16	135	6300	100	14	137	6300	156	85	137	6300
56	15	134	6300	102	14	137	6300	156.5	90	137	6300
58	15	135	6300	104	14	137	6300	157	95	137	6300
60	15	136	6300	106	14	137	6300	158	98	137	6300
62	15	136	6300	108	14	137	6300	159	100	137	6300
64	15	137	6300	110	14	137	6300				

Tabla No. 6-8 Prueba No. 5 consistencia de una lechada de cemento con 2 g de retardador, temperatura máxima de 137°C y presión máxima de 6,300 lb/pg<sup>2</sup>, tiempo máximo de espesamiento 159 minutos.



<b>PRUEBA No. 6 CON 4.5 g DE RETARDADOR</b>											
<b>ALTA TEMPERATURA = 136°C Y PRESIÓN DE 21,000 psi</b>											
Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión	Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión	Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión
min	Uc	(°C)	(psi)	min	Uc	(°C)	(psi)	min	Uc	(°C)	(psi)
0	70	27	2000	65	14	137	20500	112	12	137	21200
2	70	32	2900	65.5	14	137	20500	114	12	137	21500
3	70	38	3700	66	14	137	20500	116	12	137	21500
4	70	43	4600	66.5	14	137	20500	118	12	137	21500
5	70	43	4600	67	14	137	20500	120	12	137	21500
6	60	49	5400	67.5	14	137	20500	122	12	137	21500
10	40	55	6300	68	14	137	20500	124	12	137	21500
13	40	61	7200	69	14	137	20500	126	12	137	21500
16	38	66	8000	69.5	14	137	20500	128	15	137	21500
18	30	72	8900	69.75	14	137	20500	130	18	138	21500
20	25	77	9800	70	14	137	20500	132	18	138	21500
22	20	83	10600	70.5	14	137	20500	134	18	138	21500
24	16	88	11500	71	14	137	20500	136	18	138	21500
26	16	94	12300	72	14	137	20500	138	22	138	21500
28	15	99	13200	74	14	137	20500	140	25	138	21500
30	15	105	14100	76	14	137	20500	141	30	137	21000
32	15	111	14900	78	14	137	20500	141.5	35	137	21000
34	15	117	15000	80	14	137	20500	141.75	40	137	21000
36	14	122	16600	82	14	137	20500	142	45	136	21000
38	14	128	17500	84	12	137	21000	144	48	136	21000
40	14	133	18400	86	12	137	21000	146	50	136	21000
42	14	134	18800	88	12	137	21000	148	55	136	21000
44	14	130	19500	90	12	137	21000	150	55	136	21000
46	14	128	20000	92	12	137	21000	152	60	137	21000
48	14	132	20500	94	12	137	21000	153	70	137	21000
50	14	134	20500	96	12	137	21000	154	80	137	21000
52	14	136	20500	98	12	137	21000	155	90	137	21000
54	14	138	20500	100	12	137	21000	156	100	137	21000
56	14	138	20500	102	12	137	21000				
58	14	138	20500	104	12	137	21200				
60	14	138	20500	106	12	137	21200				
62	14	137	20500	108	12	137	21200				
64	14	137	20500	110	12	137	21200				

Tabla No. 6-9 Prueba No. 6 consistencia de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador a una temperatura máxima de 137°C y una presión máxima de 21,000 lb/pg<sup>2</sup>, tiempo máximo de espesamiento 156 minutos.

<b>PRUEBA No. 7 CON 4.5 g DE RETARDADOR</b>							
<b>ALTA TEMPERATURA = 136°C Y PRESIÓN DE 12,300 psi</b>							
Tiempo min	Consistencia Uc	Temperatura (°C)	Presión (psi)	Tiempo min	Consistencia Uc	Temperatura (°C)	Presión (psi)
0	95	27	2000	65.5	16	137	12300
2	90	32	2900	66	16	137	12300
3	80	38	3700	66.5	16	137	12300
4	75	43	4600	67	16	137	12300
5	65	49	5400	67.5	16	137	12300
6	65	55	6300	68	16	137	12300
10	60	61	7200	69	16	137	12300
13	40	66	8000	69.5	16	137	12300
16	30	72	8900	69.75	16	137	12300
18	25	77	9800	70	16	137	12300
20	18	83	10600	70.5	16	137	12300
22	15	88	11500	71	16	137	12300
24	14	94	12000	72	16	137	12300
26	12	99	12300	74	16	137	12300
28	12	105	12300	76	16	137	12300
30	12	111	12300	78	16	137	12300
32	12	117	12300	80	16	137	12300
34	12	122	12300	82	16	137	12300
36	15	128	12300	84	16	137	12300
38	16	133	12300	86	16	137	12300
40	15	128	12300	88	16	137	12300
42	14	129	12300	90	16	137	12300
44	14	130	12300	92	16	137	12300
46	14	132	12300	94	16	137	12300
48	15	136	12300	96	16	137	12300
50	15	137	12300	98	16	137	12300
52	15	138	12300	100	16	137	12300
54	15	138	12300	102	16	137	12300
56	15	138	12300	104	16	137	12300
58	15	138	12300	106	16	137	12300
60	15	138	12300	108	16	137	12300
62	15	138	12300	110	18	137	12300
64	16	138	12300	112	18	137	12300
65	16	137	12300	114	18	137	12300

(continúa...)

<b>(CONTINUACIÓN)</b>							
<b>PRUEBA No. 7 CON 4.5 g DE RETARDADOR</b>							
<b>ALTA TEMPERATURA = 136°C Y PRESIÓN DE 12,300 psi</b>							
Tiempo min	Consistencia Uc	Temperatura (°C)	Presión (psi)	Tiempo min	Consistencia Uc	Temperatura (°C)	Presión (psi)
116	18	137	12300	162	22	137	12300
118	18	137	12300	163	22	137	12300
120	18	137	12300	164	22	137	12300
122	18	137	12300	164.5	22	137	12300
124	18	137	12300	165	22	137	12300
126	18	137	12300	166	22	137	12300
128	18	137	12300	168	22	137	12300
130	18	137	12300	170	26	137	12300
132	18	137	12300	172	26	137	12300
134	18	137	12300	174	26	137	12300
136	18	137	12300	176	28	137	12300
138	18	137	12300	176.5	29	137	12300
140	18	137	12300	177	29	137	12300
141	18	137	12300	177.3	29	137	12300
141.5	18	137	12300	177.6	29	137	12300
141.75	18	137	12300	178	29	137	12300
142	18	137	12300	180	30	137	12300
144	18	137	12300	182	32	137	12300
146	18	137	12300	184	32	137	12300
148	18	137	12300	186	32	137	12300
150	18	137	12300	186.5	32	137	12300
152	18	137	12300	187	32	137	12300
153	18	137	12300	187.5	32	137	12300
154	18	137	12300	188	32	137	12300
155	20	137	12300	190	40	137	12300
156	20	137	12300	191	50	137	12300
156.5	20	137	12300	192	60	137	12300
157	20	137	12300	192.5	70	137	12300
158	20	137	12300	193	80	137	12300
159	22	137	12300	193.5	90	137	12300
160	22	137	12300	194	100	137	12300

Tabla No. 6-10 Prueba No. 7 consistencia de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador temperatura máxima de 137°C y presión máxima de 12,300 lb/pg<sup>2</sup>, tiempo máximo de espesamiento 194 minutos.

<b>PRUEBA No. 8 CON 4.5 g DE RETARDADOR</b>											
<b>ALTA TEMPERATURA = 136°C Y PRESION DE 6,300 psi</b>											
Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión	Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión	Tiempo	Consistencia	Temperatura	Presión
min	Uc	(°C)	(psi)	min	Uc	(°C)	(psi)	min	Uc	(°C)	(psi)
0	70	27	2000	65	36	138	6300	112	30	137	6300
2	60	32	2900	65.5	36	138	6300	114	22	137	6300
3	60	38	3700	66	32	138	6300	116	20	137	6300
4	65	43	4600	66.5	32	138	6300	118	22	137	6300
5	60	49	5400	67	32	138	6300	120	18	137	6300
6	30	55	6300	67.5	32	138	6300	122	18	137	6300
10	20	61	6300	68	30	138	6300	124	18	137	6300
13	20	61	6300	69	30	137	6300	126	18	137	6300
16	16	66	6300	69.5	30	137	6300	128	18	137	6300
18	15	72	6300	69.75	30	137	6300	130	18	137	6300
20	15	77	6300	70	30	137	6300	132	22	137	6300
22	15	83	6300	70.5	30	137	6300	134	18	137	6300
24	15	88	6300	71	30	137	6300	136	18	137	6300
26	15	94	6300	72	28	137	6300	138	18	137	6300
28	15	99	6300	74	26	137	6300	140	18	137	6300
30	25	105	6300	76	25	137	6300	141	18	137	6300
32	35	111	6300	78	25	137	6300	141.5	18	137	6300
34	32	117	6300	80	24	137	6300	141.75	18	137	6300
36	45	122	6300	82	24	137	6300	142	18	137	6300
38	55	128	6300	84	24	137	6300	144	18	137	6300
40	85	133	6300	86	22	137	6300	146	18	137	6300
42	70	127	6300	88	20	137	6300	148	18	137	6300
44	50	126	6300	90	30	137	6300	150	18	137	6300
46	40	129	6300	92	22	137	6300	152	18	137	6300
48	45	133	6300	94	32	137	6300	153	18	137	6300
50	50	136	6300	96	22	137	6300	154	18	137	6300
52	45	137	6300	98	30	137	6300	155	18	137	6300
54	36	138	6300	100	22	137	6300	156	18	137	6300
56	55	138	6300	102	30	137	6300	156.5	18	137	6300
58	42	138	6300	104	22	137	6300	157	18	137	6300
60	40	138	6300	106	30	137	6300	158	18	137	6300
62	40	138	6300	108	30	137	6300	159	18	137	6300
64	36	138	6300	110	22	137	6300	160	18	137	6300

(continúa...)

<b>(CONTINUACIÓN)</b>							
<b>PRUEBA No. 8 CON 4.5 g DE RETARDADOR</b>							
<b>ALTA TEMPERATURA = 136°C Y PRESION DE 6,300 psi</b>							
Tiempo min	Consistencia Uc	Temperatura (°C)	Presión (psi)	Tiempo min	Consistencia Uc	Temperatura (°C)	Presión (psi)
162	18	137	6300	200	18	136	6300
163	18	137	6300	202	18	136	6300
164	18	137	6300	204	18	136	6300
164.5	18	137	6300	206	18	136	6300
165	18	137	6300	208	20	137	6300
166	18	137	6300	210	22	137	6300
168	18	137	6300	212	25	136	6300
170	18	137	6300	214	30	137	6300
172	18	137	6300	216	30	137	6300
174	18	139	6300	218	30	137	6300
176	18	139	6300	220	32	136	6300
176.5	18	139	6300	222	32	137	6300
177	18	139	6300	224	32	137	6300
177.3	18	139	6300	226	35	137	6300
177.6	18	139	6300	228	38	137	6300
178	18	139	6300	230	38	137	6300
180	18	136	6300	232	40	137	6300
182	18	136	6300	234	40	137	6300
184	18	136	6300	236	45	136	6300
186	18	136	6300	238	45	136	6300
186.5	18	136	6300	240	45	136	6300
187	18	136	6300	242	45	136	6300
187.5	18	136	6300	244	46	137	6300
188	18	136	6300	246	48	136	6300
190	18	136	6300	248	58	136	6300
191	18	136	6300	250	68	137	6300
192	18	136	6300	251	70	137	6300
192.5	18	136	6300	251.5	80	137	6300
193	18	136	6300	252	90	137	6300
193.5	18	136	6300	253	95	137	6300
194	18	136	6300	254	95	137	6300
196	18	136	6300	255	100	137	6300
198	18	136	6300				

Tabla No. 6-11 Prueba No. 8 consistencia de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador, temperatura máxima de 137°C y presión máxima de 6,300 lb/pg<sup>2</sup>, tiempo máximo de espesamiento 255 minutos.

A continuación se resumen los datos de estas pruebas obteniéndose los siguientes resultados.

No. de Prueba	Temperatura (°C)	Presión (psi)	Retardador (g)	% de Peso en cemento	Tiempo máximo de espesamiento (min)
1	50	6000	0	-	104
2	111	15000	0	-	30
3	136	19500	2	0.23	67.5
4	136	12000	2	0.23	71
5	136	6000	2	0.23	159
6	136	21000	4.5	0.52	156
7	136	12000	4.5	0.52	194
8	136	6000	4.5	0.52	255

Tabla No. 6-12 Resumen de pruebas con el consistómetro a las lechadas de cemento.

#### 6.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CONSISTENCIA.

En la Tabla 6-12 se observa la fuerte dependencia que tiene el tiempo de espesamiento respecto al incremento de la presión a temperatura constante de la prueba 3 a la 8. Para la prueba No. 1 se usó la cédula No. 5 del API, obteniendo un tiempo de espesamiento de la lechada de 104 minutos, la cual fue sometida a bajas condiciones de temperatura y presión, es decir de 50°C y 6,000 lb/pg<sup>2</sup> respectivamente. En la prueba No. 2 en donde se usó la cédula 31 del API sometiendo la lechada de cemento a altas condiciones de presión y temperatura, en donde no se logró alcanzar las condiciones finales de la cédula, es decir 18,800 lb/pg<sup>2</sup> y 136°C, obteniendo un tiempo de espesamiento máximo de la lechada de cemento de 30 minutos con 111°C y 15,000 lb/pg<sup>2</sup>. Se decidió hacer uso de un retardador para la reacción química de hidratación y de esta manera poder alcanzar las condiciones de operación. Para las pruebas 3, 4 y 5 se usó 2 g de retardador como límite inferior correspondiente al 0.23 % en peso de cemento y se sometió a la lechada de cemento a una temperatura de 136°C pero a tres diferentes niveles de presión, es decir a

19,500, 12,300 y 6,300 lb/pg<sup>2</sup> respectivamente para cada una de las pruebas, lo cual dio como resultado un incremento en el tiempo máximo de espesamiento que correspondió a 67.5, 71 y 159 minutos. A partir de estas observaciones es claro como al disminuir la presión se incrementa el tiempo de espesamiento de la lechada de cemento o visto de otra forma se retrasa el tiempo de la reacción de hidratación de la lechada y viceversa al aumentar la presión se reduce el tiempo de espesamiento y por lo tanto se acelera la reacción de hidratación.

Para las pruebas 6, 7 y 8 se incrementó la concentración de retardador a 4.5 g correspondiente a un 0.52 % en peso de cemento, observando con esto un mayor incremento en los tiempos de espesamiento y un efecto más marcado para los tres niveles de presión analizados, es decir para las presiones de 21,000, 12,300 y 6,300 lb/pg<sup>2</sup> se observa como a menor presión aumenta mucho más el tiempo de espesamiento o viceversa a mayor presión se reduce en forma drástica el tiempo de espesamiento todo esto a la misma temperatura. En resumen podemos obtener como conclusión que además de la temperatura que es determinante como acelerador o desacelerador de la reacción de hidratación de la lechada de cemento, también la presión disminuye o aumenta la reacción y por consiguiente la aplicación conjunta de estas dos variables tendrá un efecto todavía más significativo sobre las lechadas de cemento. En un pozo promedio de la Región Sur este efecto de la presión y temperatura, es determinante durante la cementación de las tuberías de revestimiento, este mismo efecto se reprodujo en la lechada que fue sometida a las condiciones de presión y temperatura de la cédula 31, específicamente para simular la cementación de los liners o tuberías cortas. A continuación se analiza el comportamiento de las curvas de consistencia de las lechadas de cemento en función del tiempo de espesamiento resultado de las pruebas experimentales.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

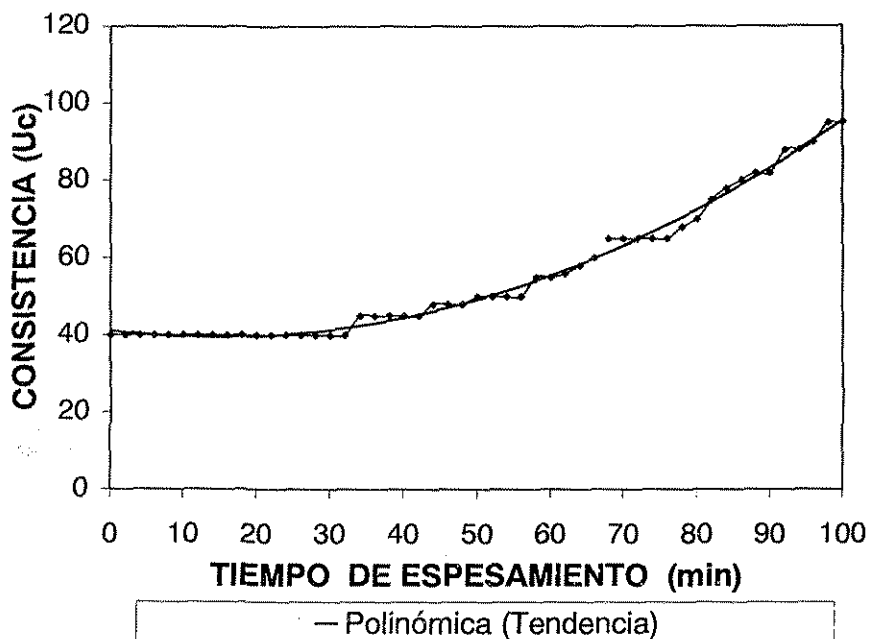


Figura 6-1 Prueba No. 1. Gráfica de consistencia-tiempo de espesamiento de una lechada de cemento, cédula 5,  $T_{max}= 53^{\circ}C$  y  $P_{max}= 6,000 \text{ lb/pg}^2$ , tiempo máximo de espesamiento 103 minutos.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

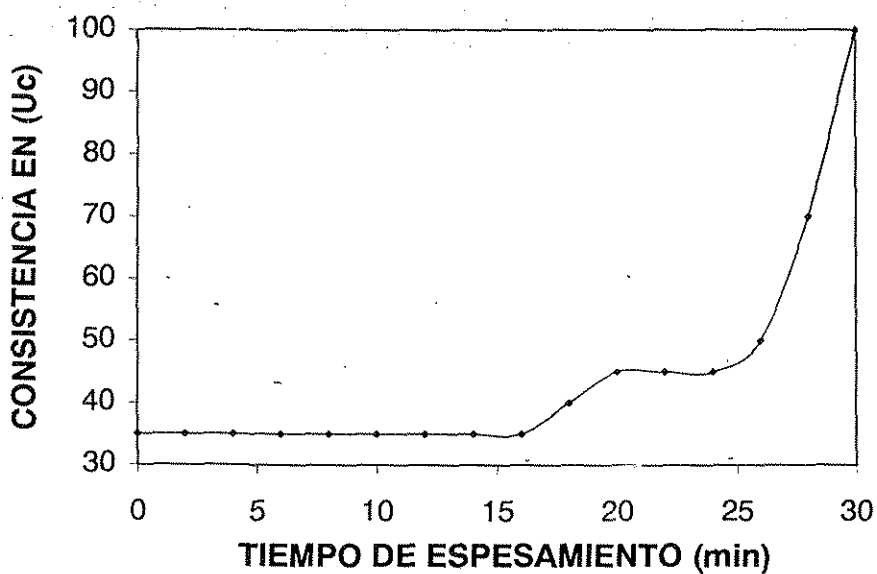


Figura 6-2 Prueba No. 2. Gráfica de consistencia-tiempo de espesamiento de una lechada de cemento, cédula 31,  $T_{max}= 111^{\circ}C$  y  $P_{max}= 15,000 \text{ lb/pg}^2$ , tiempo máximo de espesamiento 30 minutos.



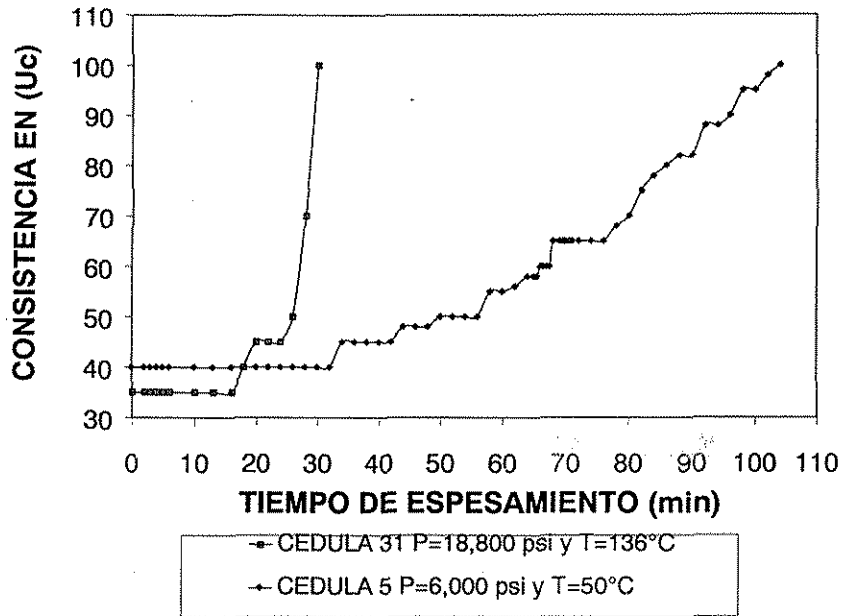
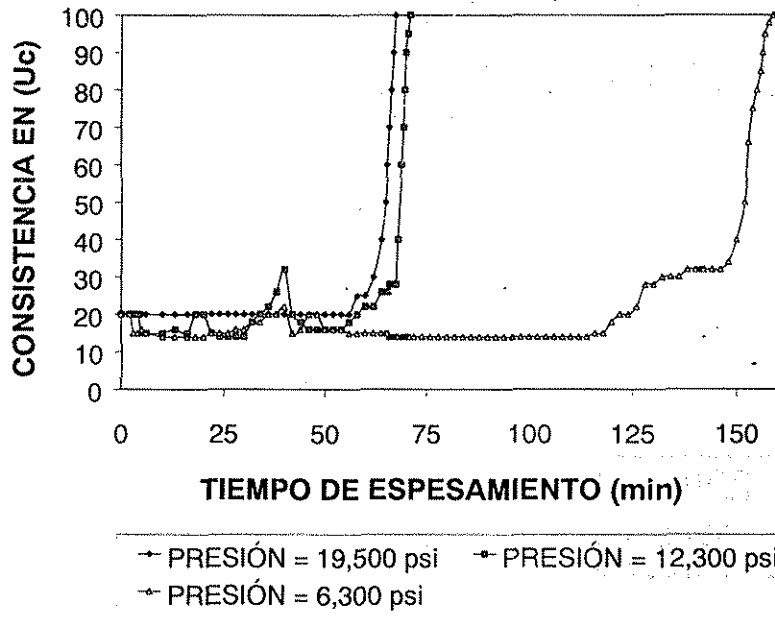


Figura 6-3 Pruebas 1 y 2 Gráfica comparativa de consistencia-tiempo de espesamiento de las lechadas de cemento a alta y baja presión y temperatura.



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura 6-4 Pruebas 3, 4 y 5. Gráfica de consistencia-tiempo de espesamiento a diferentes niveles de presión  $P_{max}=19,500$ ,  $P_{max}=12300$  y  $P_{max}=6,300$  lb/pg<sup>2</sup>, temperatura de 136°C, concentración de retardador de 0.23 %, tiempos máximos de espesamiento 67.5, 71 y 159 minutos.

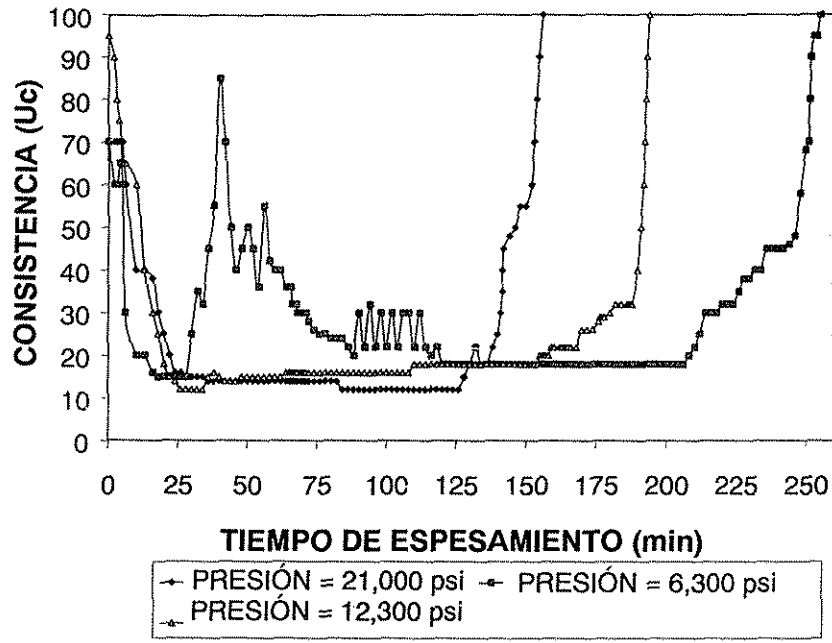
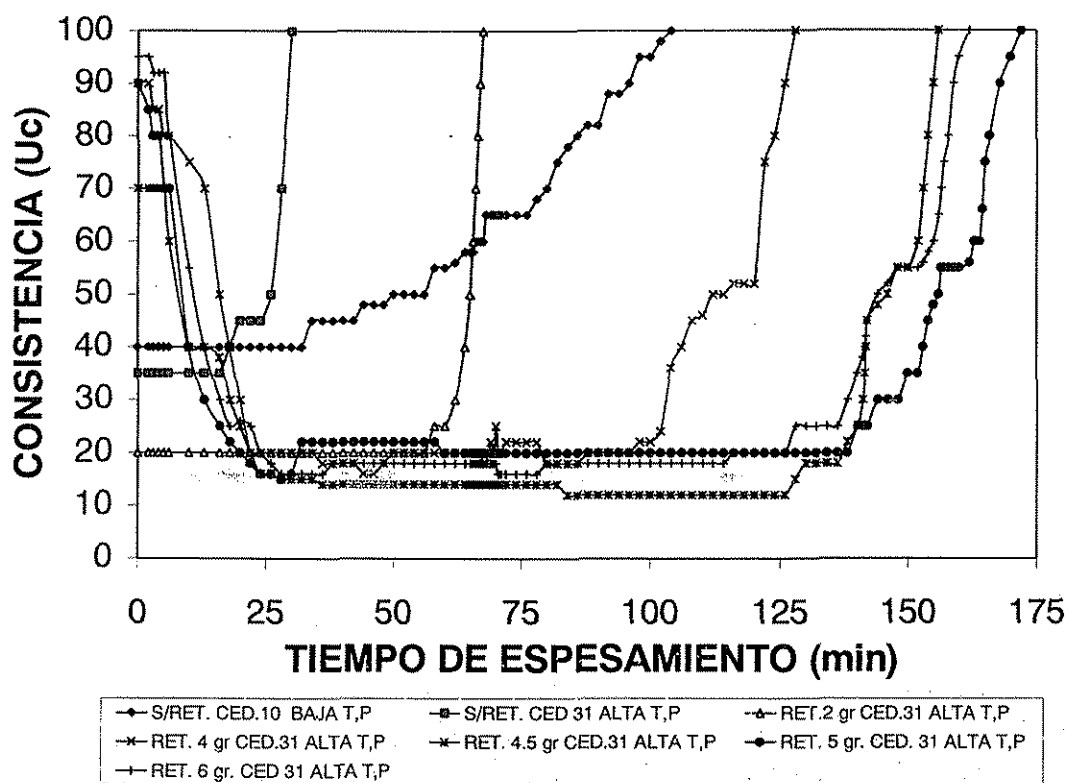


Figura 6-5 Pruebas 6, 7 y 8. Gráfica de consistencia-tiempo de espesamiento a diferentes niveles de presión  $P_{max}=21,000$ ,  $P_{max}=12,300$  y  $P_{max}=6,300$  lb/pg<sup>2</sup>, temperatura de 136°C concentración de retardador de 0.52 %.. tiempos máximos de espesamiento de 156, 194 y 255 minutos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 6-6 Pruebas 1,2,3,4,5,6, 7 y 8. Gráfica comparativa de consistencia- tiempo de espesamiento, a diferentes concentraciones de retardador (0,0.23,0.46,0.52,0.58 y 0.69 %), tiempos máximos de espesamiento 104, 30, 67.5,71, 159,156, 194 y 255 minutos.

En la Figura 6-1 se muestra la gráfica de la Prueba No. 1 basada en las condiciones de baja presión y temperatura de la cédula No. 5 del API correspondientes a una temperatura máxima de 50°C y una presión de 6000 lb/pg<sup>2</sup>, dando como resultado un tiempo máximo de espesamiento 103 minutos, en la que se observa como el incremento de la consistencia tiene un comportamiento exponencial definido por la curva de consistencia en función del tiempo de espesamiento que es indicativo del incremento de la viscosidad a estas condiciones de presión y temperatura.

En la prueba No. 2 graficada en la Figura 6-2 la lechada de cemento se sometió a las condiciones 111°C y 15,000 lb/pg<sup>2</sup>, se obtuvo como resultado un tiempo máximo de espesamiento de 30 minutos se observa como a diferencia de la anterior, en donde la consistencia seguía una clara tendencia de incremento en forma exponencial, el comportamiento de la curva de consistencia tiene ahora dos puntos de inflexión es

RECIBIDO  
EN LA BIBLIOTECA

decir tiene un incremento, el cual explica la formación de un banco de gel a un tiempo medio de espesamiento para después continuar el incremento de la consistencia hasta pasar del estado líquido al semisólido por efecto de la alta presión y temperatura a pesar de los esfuerzos que destruyen el banco de gel inicial por la rotación de la celda y la paleta del consistómetro.

En la Figura 6-3 se muestran en forma comparativa los resultados de las pruebas 1 y 2. En donde se observa una drástica reducción en el tiempo de espesamiento.

En la Figura 6-4 se muestra la gráfica de la consistencia de las lechadas de cemento, de las pruebas 3, 4 y 5 sometidas a una temperatura constante de 136°C pero a tres diferentes niveles de presión a 19500, 12300 y 6300 lb/pg<sup>2</sup> respectivamente con concentración de 2 g de retardador que corresponde al 0.23 % en peso de cemento, dando como resultado tiempos máximos de espesamiento 67.5, 71 y 159 minutos respectivamente. Al mantener la temperatura constante en los tres experimentos aislamos esta variable y observamos los cambios debidos exclusivamente a la presión. Un incremento en la presión acelera el tiempo de espesamiento propiciando la unión entre los cristales de la estructura de gel en formación, facilitando y consolidando su crecimiento.

En la Figura 6-5 se muestran los resultados de la pruebas 6, 7 y 8, en donde se observa la gráfica de consistencia de las lechadas de cemento, con concentraciones de 4.5 g de retardador correspondientes al 0.52 % en peso de cemento, dando como resultado los tiempos máximos de espesamiento de 156, 194 y 255 minutos respectivamente. En este caso se aprecia como a mayor concentración de retardador acentúa y prolonga en tiempo el comportamiento de espesamiento de la lechada debido a la influencia de la presión, observado en el experimento con menor concentración de retardador. Una observación muy importante en las curvas de consistencia de estas pruebas, es que existe un incremento de la consistencia que forma estructuras de gel a pesar de tener el retardador en su límite superior de concentración, esto nos permite visualizar que durante la cementación tenemos un incremento considerable en la viscosidad de la lechada de cemento a pesar de que se utilicen aditivos retardadores. Esto puede tener consecuencias positivas o negativas

durante una cementación sin embargo es un fenómeno que se presenta al someter las lechadas de cemento a las condiciones de presión y temperatura promedio de la Región Sur y es necesario considerarlo ya que ayudará a optimizar las operaciones de cementación.

Finalmente en la Figura 6-6 se muestran todas las pruebas 1,2,3,4,5,6, 7 y 8, con sus gráficas de consistencia a las diferentes lechadas de cemento, a tres niveles diferentes de concentraciones de retardador con 0.0, 0.23 y 0.52 % en peso de cemento, obteniendo como resultado de las pruebas experimentales los siguientes tiempos máximos de espesamiento de 104, 30, 67.5 71, 159, 156, 194 y 255 minutos, respectivamente para cada una de las pruebas. En donde se puede observar el incremento o disminución de la velocidad de reacción química de hidratación de la lechada de cemento (fraguado), ligados al incremento o disminución de la presión a una misma temperatura.

## CAPITULO 7. PRUEBAS REOLÓGICAS DE LAS LECHADAS DE CEMENTO

Los resultados de las pruebas con el consistómetro fueron la base para realizar las pruebas reológicas de las lechadas de cemento, estas se realizaron con el viscosímetro Fann 70<sup>10</sup>, el cual, es un dispositivo para medir la reología de los fluidos a alta presión (20,000 lb/pg<sup>2</sup>) y temperatura (500°F), sin embargo, no está diseñado para medir la reología de las lechadas de cemento, ya que no se tiene un control de la velocidad de reacción de la lechada como el que proporciona un retardador eficiente, no obstante se puede correr el peligro de fraguar la lechada dentro de la celda de prueba, resultando casi imposible despegar las piezas que la constituyen.

En las pruebas realizadas con el consistómetro se seleccionó uno de los retardadores con mayor eficiencia, se ensayaron varias concentraciones de retardador específicamente 2, 4 y 4.5 g en peso de cemento, las concentraciones de retardador se obtuvieron experimentalmente dando como resultado 2 g para el límite inferior y 4.5 g como límite superior, se estimó conveniente tomar el límite superior de 4.5 g que corresponde a una concentración de 0.52 % en peso de cemento, debido a que con estas concentraciones se presentó mayor estabilidad química para poder realizar las pruebas reológicas. Esta concentración de 0.52% de retardador ofreció intervalos más amplios del tiempo máximo de espesamiento siendo estos de 156,194 y 255 minutos para los tres diferentes niveles de presión 21,000, 12,300 y 6,300 lb/pg<sup>2</sup> respectivamente de las pruebas 6,7 y 8 de tiempo de espesamiento, a una temperatura de 136°C como se muestra en la Figura 6-5 del capítulo 6. La opción de tener el límite máximo de concentración de retardador, ofreció la posibilidad de tener bajo control los más altos tiempos de espesamiento, los cuales, permitieron obtener el mayor número posible de mediciones reológicas.

El Fann 70 es un viscosímetro de cilindros coaxiales para alta presión y temperatura fue descrito en la Figura 2-2 del capítulo 2 y su funcionamiento es de la siguiente manera: se coloca la muestra de 175 ml de lechada en la celda de prueba que está constituida de metales resistentes a la corrosión, incluye un bulbo con un rotor que está constituido por un imán el cual se mueve por un campo magnético generado por

un motor que se encuentra en la parte inferior de la celda. En la parte superior de la celda cuenta con un sensor de ángulo de torsión magnético que traduce las lecturas del resorte a esfuerzos de corte y las envía a una consola de control. Esta última cuenta además con un controlador de temperatura y una perilla para fijar las velocidades de corte. Adicionalmente cuenta con una bomba hidráulica de accionamiento manual para el control de la presión, un sistema de calentamiento a base de una resistencia y un sistema de enfriamiento que funciona con circulación de agua.

### 7.1. CONSIDERACIONES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA.

La presión se controló con la bomba hidráulica siguiendo las cédulas No. 5 y 31 del API hasta alcanzar la presión máxima. La temperatura se programó en el controlador del viscosímetro de acuerdo a las mismas normas.

En la Prueba No. 1 se determinó la reología en función del tiempo (inciso 7.2) de una lechada de cemento a condiciones de baja presión y temperatura sin retardador con la cédula 5 alcanzando una temperatura máxima de 52°C y una presión máxima de 5,200 lb/pg<sup>2</sup>. En la Figura 7-1 se observa la gráfica del comportamiento de la temperatura durante el desarrollo de la prueba y en la Figura 7-2 se observa el comportamiento de la presión durante la misma.

En la Prueba No. 2 se determinó la reología de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador para el primer nivel de presión de 6,200 lb/pg<sup>2</sup> y una temperatura de 138°C. En la Figura 7-3 se observa la gráfica del comportamiento de la temperatura durante el desarrollo de la prueba y en la Figura 7-4 se observa el comportamiento de la presión durante la misma, hubo una diferencia en la temperatura de 2°C que no fue posible ajustar durante la prueba. En comparación con la anterior, en esta prueba se incrementó únicamente la temperatura de 52 a 138°C y el incremento de presión de 1,200 lb/pg<sup>2</sup> no fue significativo, pero se alcanzó el primer nivel de presión durante la prueba a 6,200 lb/pg<sup>2</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En la Prueba No. 3 se determinó la reología de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador para el segundo nivel de presión de 12,000 lb/pg<sup>2</sup> y una temperatura de 136°C. En la Figura 7-5 se observa la gráfica del comportamiento de la temperatura durante el desarrollo de la prueba y en la Figura 7-6 se observa el comportamiento de la presión durante la misma. En comparación con la prueba No. 2 en esta se mantuvo la temperatura a 136°C y se incrementó la presión a un segundo nivel de 12000 lb/pg<sup>2</sup>.

En la Prueba No. 4 se determinó la reología de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador siguiendo la cédula No. 31 para el tercer nivel de presión de 18,800 lb/pg<sup>2</sup> y una temperatura de 136°C. En la Figura 7-7 se observa la gráfica del comportamiento de la temperatura durante el desarrollo de la prueba y en la Figura 7-8 se observa el comportamiento de la presión durante la misma. En comparación con la prueba No. 3 se mantuvo nuevamente la temperatura en 136°C y se incrementó la presión a un tercer nivel de 18,800 lb/pg<sup>2</sup>, correspondientes a la presión y temperatura máximas de la cédula No. 31.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



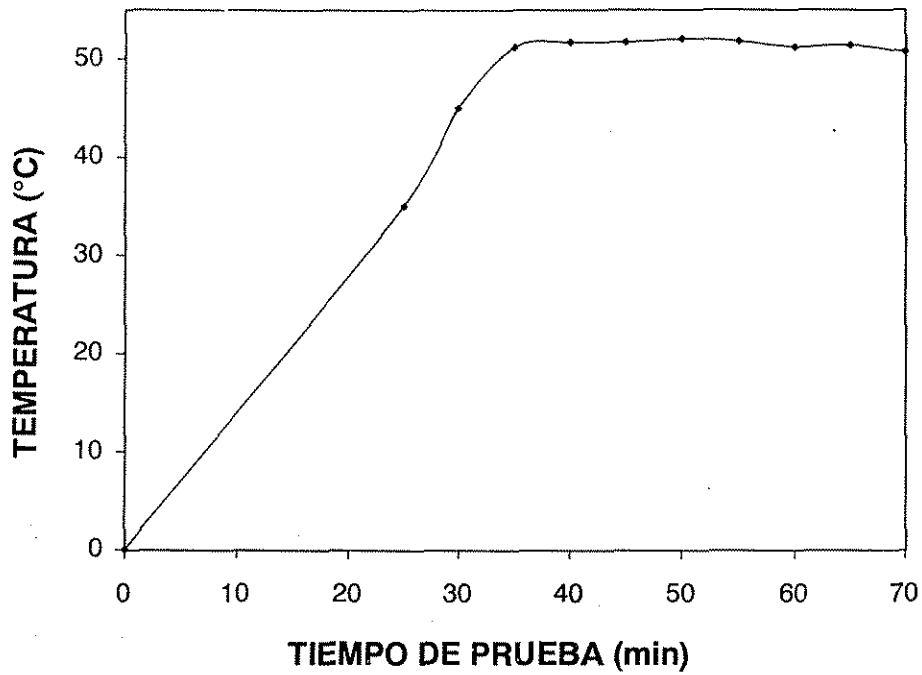


Figura 7-1 Comportamiento de la temperatura en una lechada de cemento para la prueba reológica No.1, sin retardador,  $T_{max} = 52^{\circ}C$  y  $P_{max} = 5,200 \text{ lb/pg}^2$ .

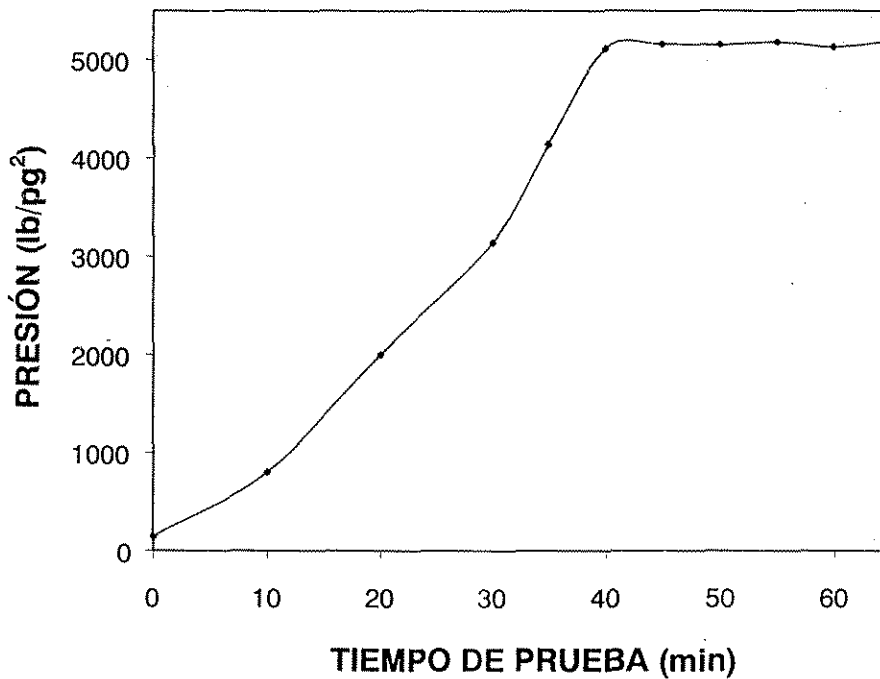


Figura 7-2 Comportamiento de la presión en una lechada de cemento para la prueba reológica No.1, sin retardador,  $T_{max} = 52^{\circ}C$  y  $P_{max} = 5,200 \text{ lb/pg}^2$ .

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

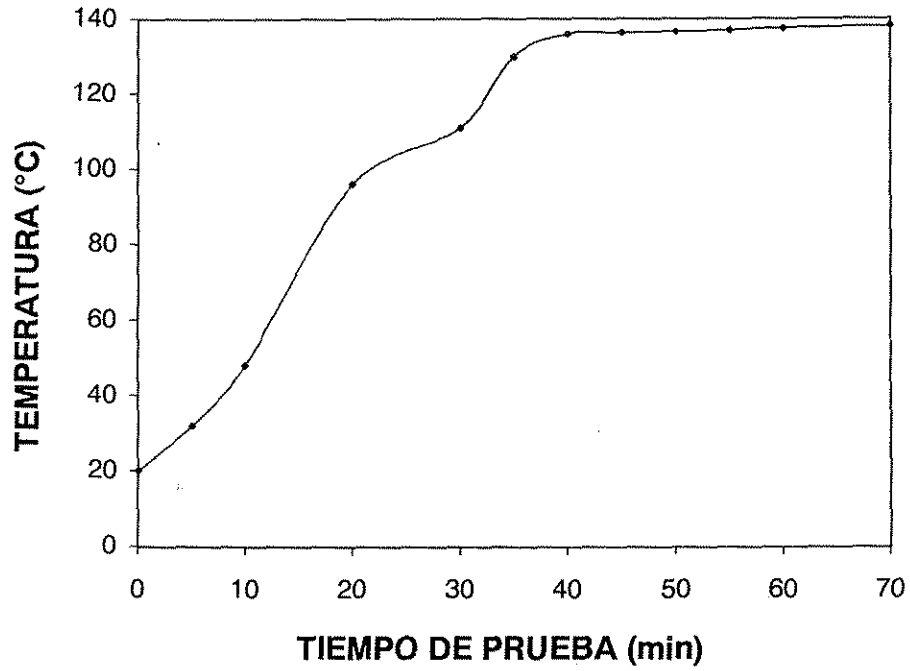
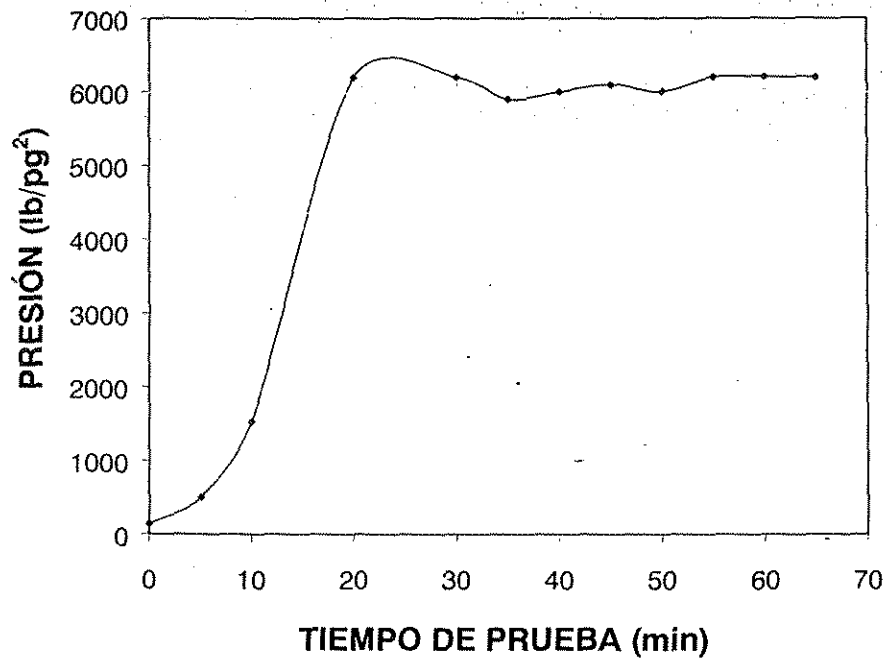


Figura 7-3 Comportamiento de la temperatura en una lechada de cemento para la prueba reológica No.2 con 4.5 g de retardador  $T_{max} = 138^{\circ}C$  y  $P_{max} = 6,200 \text{ lb/pg}^2$ .



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura 7-4 Comportamiento de la presión en una lechada de cemento para la prueba reológica No. 2 con 4.5 g de retardador  $T_{max} = 138^{\circ}C$  y  $P_{max} = 6,200 \text{ lb/pg}^2$ .

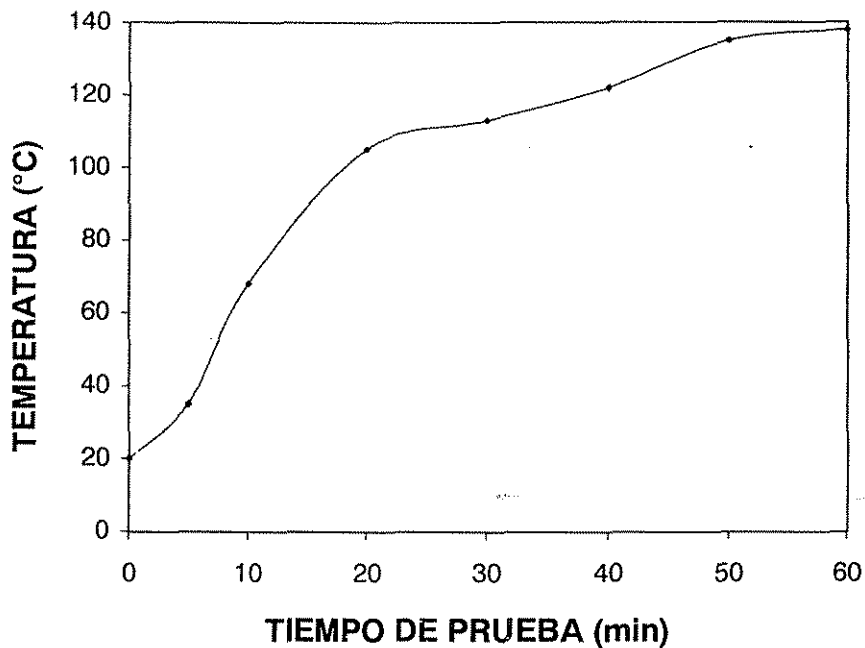


Figura 7-5 Comportamiento de la temperatura en una lechada de cemento para la prueba reológica No. 3, con 4.5 g de retardador  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 12,000 \text{ lb/pg}^2$ .

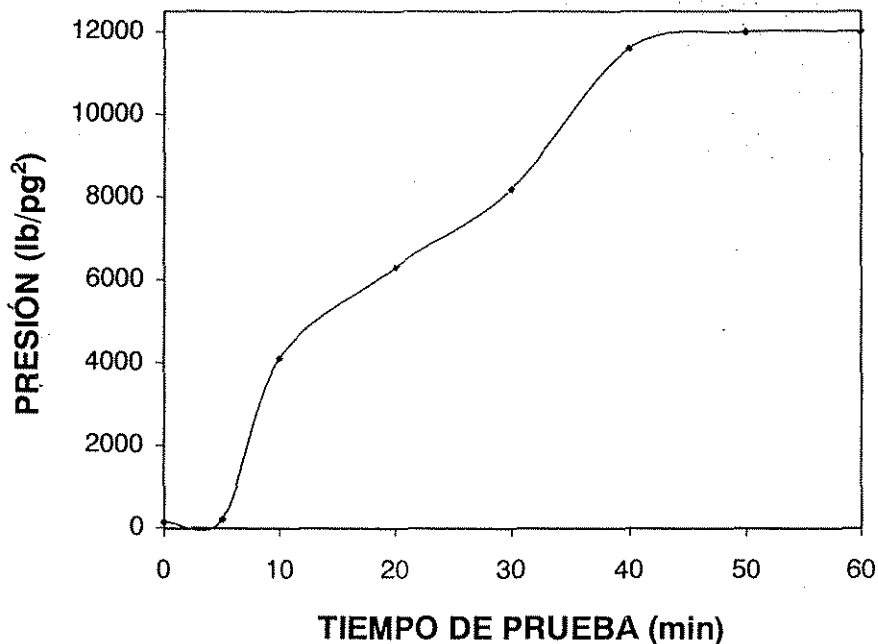


Figura 7-6 Comportamiento de la presión en una lechada de cemento para la prueba reológica No. 3, con 4.5 g de retardador  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 12,000 \text{ lb/pg}^2$ .

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

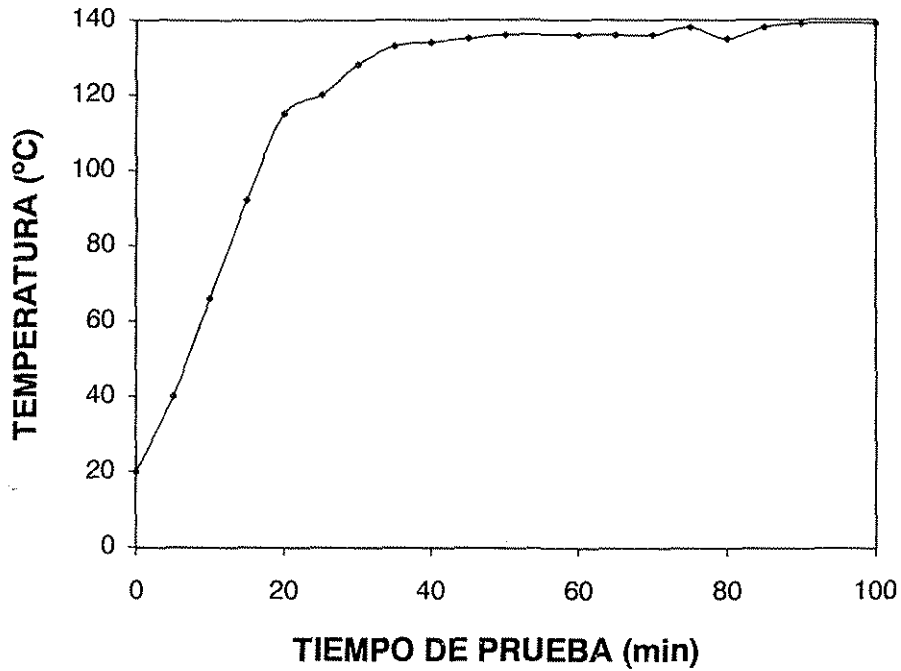


Figura 7-7 Comportamiento de la temperatura en una lechada de cemento, prueba reológica No. 4, con 4.5 g de retardador, cédula No. 31 API  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 18,800 \text{ lb/pg}^2$ .

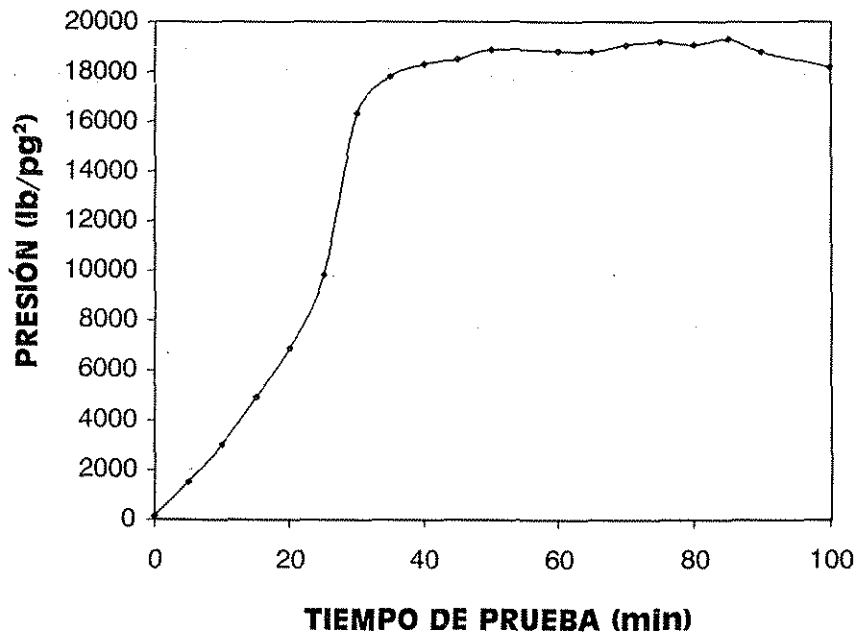


Figura 7-8 Comportamiento de la presión en una lechada de cemento, prueba reológica No.4, con 4.5 g de retardador, cédula No. 31 API  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 18,800 \text{ lb/pg}^2$ .

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## 7.2 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS REOLÓGICAS.

Las pruebas reológicas se efectuaron en un viscosímetro Fann 70<sup>10</sup> para alta presión y temperatura como el descrito en la Figura 2-2 del capítulo 2, la lechada se preparó siguiendo el procedimiento de la norma RP10 del API al igual que las pruebas efectuadas con el consistómetro pero con un volumen de muestra más pequeño correspondiente a 175 ml. Se realizaron 4 pruebas reológicas: La prueba reológica No. 1 para bajas condiciones de presión y temperatura, siguiendo la cédula No. 5, a los 35 minutos se alcanzó el máximo nivel de temperatura de 52°C y la presión final se alcanzó aproximadamente a los 40 minutos de la prueba como se puede observar en la Figuras 7-1 y 7-2 para la temperatura y la presión respectivamente. Las mediciones reológicas se efectuaron a las velocidades de corte de 3,6,100,200,300 y 600 revoluciones por minuto, en cada una de estas velocidades de corte se tomaron las mediciones de los esfuerzos de corte, se efectuaron 11 mediciones en total a los 5,10,20,30,35,40,45,50,55,60 y 65 minutos. En la Tabla 7-1 se observa un incremento sostenido de las lecturas con el viscosímetro en función del tiempo, alcanzando su valor más alto a los 65 minutos después de iniciada la prueba.

VELOCIDAD DE CORTE	PRUEBA No. 1										
	$T_{\max}=52^{\circ}\text{C}$ $P_{\max}=5200$ psi Esfuerzo de corte lb/100pie <sup>2</sup>										
	Tiempo (minutos)										
RPM	5	10	20	30	35	40	45	50	55	60	65
600	180	184	208	246	276	326	342	396	518	568	986
300	94	98	116	140	158	200	250	360	446	538	594
200	80	84	114	120	154	190	238	316	376	470	560
100	60	66	92	100	122	142	160	228	286	366	448
6	14	22	46	52	46	56	68	100	160	246	318
3	12	18	26	30	30	32	50	98	154	200	306
TEMPERATURA (°C)	7.5	14	28	45	51	52	52	52	52	51.5	52
PRESIÓN (lb/pg <sup>2</sup> )	400	800	2000	3150	4150	5100	5200	5200	5200	5200	5200

Tabla 7-1 Reología de una lechada de cemento, con la cédula 5 API en función del tiempo, sin retardador a condiciones de  $T_{\max} = 52^{\circ}\text{C}$  y una  $P_{\max} = 5,200$  lb/pg<sup>2</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La prueba reológica No. 2 se efectuó para un primer nivel de presión con 4.5 g de retardador siguiendo el incremento de temperatura de la cédula No. 5, a los 40 minutos se alcanzó el máximo nivel de temperatura 136°C y la presión final de 6,200 lb/pg<sup>2</sup> se alcanzó aproximadamente a los 20 minutos de la prueba como se puede observar en la Figuras 7-3 y 7-4 para la temperatura y la presión respectivamente. Las mediciones reológicas se efectuaron a las velocidades de corte de 3,6,100,200,300 y 600 revoluciones por minuto, en cada una de estas velocidades de corte se tomaron las mediciones de los esfuerzos de corte, se efectuaron 14 mediciones para cada una de las velocidades de corte a los 5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65 y 70 minutos. En la Tabla 7-2 los valores observados de los esfuerzos de corte, alcanzan su valor más alto a los 70 minutos después de iniciada la prueba. Durante el desarrollo de la prueba se presentó una variación en la medición de los esfuerzos de corte que se atribuye a la reacción de hidratación de la lechada por la presión y la temperatura.

VELOCIDAD DE CORTE	PRUEBA No. 2													
	T <sub>max</sub> = 138°C P <sub>max</sub> = 6,200 psi Esfuerzo de corte en lb/100 pie <sup>2</sup>													
	Tiempo (minutos)													
RPM	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
600	218	172	180	170	152	132	110	100	212	250	252	250	254	494
300	106	86	74	78	80	94	88	76	164	166	170	172	188	480
200	84	72	68	72	72	80	82	72	142	144	146	150	164	444
100	70	62	60	68	66	72	74	74	96	106	116	124	144	414
6	58	56	68	68	74	64	60	60	78	74	96	92	104	360
3	58	56	64	66	72	64	60	60	66	70	76	80	104	360
TEMPERATURA (°C)	32	48	75	96	105	111	130	136	136	136	136	137	138	138
PRESIÓN (lb/pg <sup>2</sup> )	500	1500	4300	6250	6500	6250	5900	6000	6200	6000	6200	6200	6200	6200

Tabla 7-2 Reología de una lechada de cemento, siguiendo la temperatura con la cédula 31 API en función del tiempo, 4.5 g de retardador a condiciones de T<sub>max</sub> = 138°C y una P<sub>max</sub> = 6,200 lb/pg<sup>2</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La prueba reológica No. 3 se efectuó para un segundo nivel de presión siguiendo el incremento de temperatura de la cédula No. 31, a los 50 minutos se alcanzó el máximo nivel de temperatura 136°C y la presión final de 12,000 lb/pg<sup>2</sup> se alcanzó aproximadamente a los 50 minutos de la prueba como se puede observar en la Figuras 7-5 y 7-6 para la temperatura y la presión respectivamente. Las mediciones reológicas se efectuaron a las velocidades de corte de 3,6,100,200,300 y 600 revoluciones por minuto, en cada una de estas velocidades de corte se tomaron las mediciones de los esfuerzos de corte, se efectuaron 7 mediciones para cada una de las velocidades de corte a 5,10,20,30,40,50, y 60 minutos. En la Tabla 7-3 se presentan los valores observados de los esfuerzos de corte, los cuales alcanzaron su valor más alto a los 60 minutos después de iniciada la prueba. Durante el desarrollo de la prueba se presentó una variación en la medición de los esfuerzos de corte que se atribuye a la reacción de hidratación de la lechada por la presión y la temperatura.

VELOCIDAD DE CORTE	PRUEBA No. 3						
	T <sub>max</sub> =136°C P <sub>max</sub> =12,000 psi Esfuerzo de corte en lb/100pie <sup>2</sup>						
	Tiempo (minutos)						
RPM	5	10	20	30	40	50	60
600	188	198	210	240	256	296	376
300	88	54	62	82	140	170	210
200	62	46	44	64	124	160	192
100	50	44	40	52	92	74	96
6	36	32	36	16	46	24	74
3	34	32	34	14	24	10	72
TEMPERATURA (°C)	35	68	105	112	122	136	136
PRESIÓN (lb/pg <sup>2</sup> )	200	4100	6200	8200	11600	12000	12000

Tabla 7-3 Reología de una lechada de cemento, con la cédula 31 API en función del tiempo, 4.5 g de retardador, a condiciones de T<sub>max</sub> = 136°C y una P<sub>max</sub> = 12,000 lb/pg<sup>2</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La prueba reológica No. 4 se efectuó para el tercer nivel de presión siguiendo las condiciones de presión y temperatura de la cédula No. 31, a los 35 minutos se alcanzó el máximo nivel de temperatura de 136°C y la presión final de 18,800 lb/pg<sup>2</sup> se alcanzó a los 40 minutos, como se puede observar en la Figuras 7-7 y 7-8 para la temperatura y la presión respectivamente. Las mediciones reológicas se efectuaron a las velocidades de corte de 3,6,100,200,300 y 600 revoluciones por minuto, en cada una de estas velocidades de corte se tomaron las mediciones de los esfuerzos de corte, se efectuaron 18 mediciones para cada una de las velocidades de corte a 5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,60,65,70,75,80,85,90 y 100 minutos. En la Tabla 7-4 se presentan los valores observados de los esfuerzos de corte, los cuales alcanzaron su valor más alto a los 100 minutos después de iniciada la prueba. Durante el desarrollo de la prueba se presentó una variación en la medición de los esfuerzos de corte que se atribuye a la reacción de hidratación de la lechada por la presión y la temperatura.

VELOCIDAD DE CORTE	PRUEBA No. 4																	
	T <sub>max</sub> =136°C P <sub>max</sub> =18,800 psi Esfuerzo de Corte en lb/100 pie <sup>2</sup>																	
	Tiempo (minutos)																	
RPM	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	65	70	75	80	85	90	100
600	196	156	122	110	116	124	130	150	164	124	160	126	140	172	168	280	370	378
300	68	88	58	48	50	54	54	52	92	94	86	88	100	150	134	260	320	300
200	52	84	56	44	48	50	50	50	62	74	74	72	94	124	110	204	166	260
100	48	64	52	44	44	40	40	46	52	62	56	54	70	96	82	140	54	166
6	28	34	30	20	24	34	30	26	28	30	26	26	30	84	30	44	48	46
3	26	32	24	16	22	32	28	22	26	12	24	24	12	30	32	36	24	36
TEMPERATURA (°C)	40	67	94	115	120	130	135	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136
PRESIÓN (lb/pg <sup>2</sup> )	1500	3000	5000	7000	10000	15100	17200	18200	19500	18800	18800	18800	18800	18800	18800	18800	18800	18800

Tabla 7-4 Reología de una lechada de cemento, con la cédula 31 API en función del tiempo, 4.5 g de retardador a condiciones de T<sub>max</sub> = 136°C y una P<sub>max</sub> = 18,800 lb/pg<sup>2</sup>.

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a las pruebas reológicas de las lechadas de cemento sometidas a los diferentes niveles de presión y temperatura de pozos de la Región Sur de Petróleos Mexicanos, realizadas con el viscosímetro Fann 70 en el laboratorio de perforación del Instituto Mexicano del Petróleo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### 7.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS REOLÓGICAS.

Los resultados de las pruebas reológicas se presentan en las Figuras 7-9 a 7-21, se graficó el esfuerzo de corte en ( $\text{lb}/100 \text{ pie}^2$ ) contra la velocidad de corte en (RPM) para cada una de las pruebas al pie de las gráficas se menciona si se usó o no retardador y la cantidad usada así como la temperatura y la presión máxima a que se tomaron las mediciones reológicas. Debido a la variación del rango de los esfuerzos de corte presentados en las pruebas es grande, se graficó por partes las curvas de comportamiento reológico para distinguir con mayor claridad la variación de su comportamiento en el tiempo, así para la prueba No. 1, siguiendo la cédula No. 5 sin retardador, se tienen 3 gráficas. La Figura 7-9 de 5 a 35 minutos, la Figura 7-10 de 40 a 50 minutos y la Figura 7-11 de 55 a 65 minutos.

Para la prueba No. 2 con 4.5 g de retardador, un nivel bajo de presión de  $6000 \text{ lb/pg}^2$  y una temperatura de  $136^\circ\text{C}$ , se tienen 4 gráficas. La Figura 7-12 de 5 a 25 minutos, la Figura 7-13 de 30 a 40 minutos, la Figura 7-14 de 45 a 55 minutos, la Figura 7-15 de 60 a 70 minutos.

Para la prueba No. 3 con 4.5 g de retardador, un nivel medio de presión de  $12000 \text{ lb/pg}^2$  y una temperatura de  $136^\circ\text{C}$  se tienen 2 gráficas. La Figura 7-16 de 15 a 30 minutos y la Figura 7-17 de 40 a 60 minutos.

Para la prueba No. 4 con 4.5 g de retardador, un tercer nivel de presión de  $18800 \text{ lb/pg}^2$  y una temperatura de  $136^\circ\text{C}$  siguiendo la cédula No. 31, se tienen 4 gráficas. La Figura 7-18 de 5 a 20 minutos, la Figura 7-19 de 25 a 45 minutos, la Figura 7-20 de 50 a 70 minutos y la Figura 7-21 de 75 a 100 minutos. Como ya se mencionó anteriormente durante las pruebas se observó una variación en las mediciones de los esfuerzos de corte que se deben a la naturaleza de la reacción química de la lechada, lo cual hace que la reología sea inestable durante su proceso de hidratación, como se puede observar en las gráficas de las Figuras 7-9 a 7-21, sin embargo la lechada sigue una tendencia al incremento de su viscosidad.

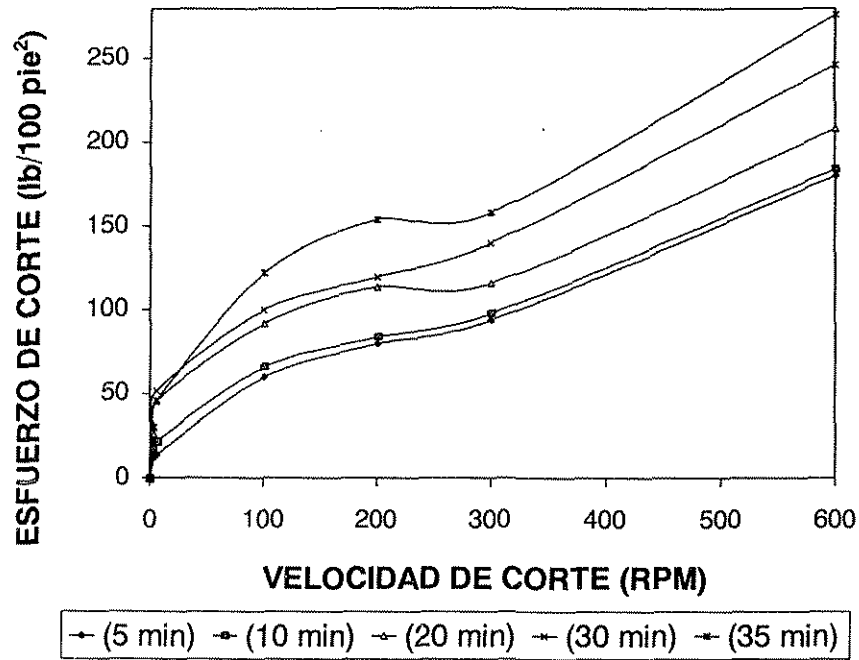


Figura 7-9 Comportamiento de la reología de 5 a 35 minutos en una lechada de cemento sin retardador a  $T_{max} = 52^{\circ}C$  y  $P_{max} = 5,200 \text{ lb/pg}^2$ .

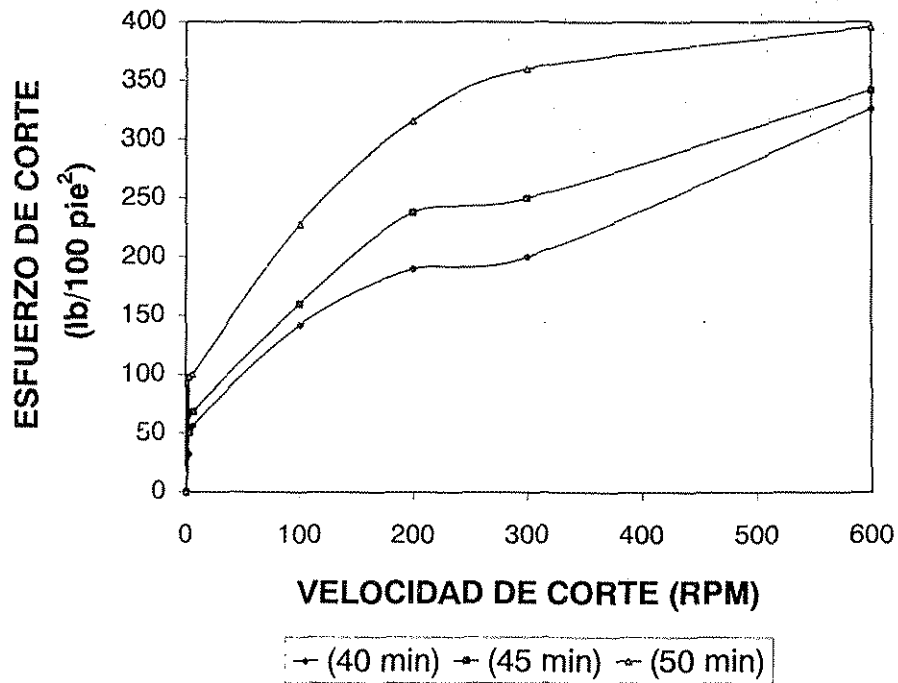


Figura 7-10 Comportamiento de la reología de 40 a 50 minutos en una lechada de cemento sin retardador. a  $T_{max} = 52^{\circ}C$  y  $P_{max} = 5,200 \text{ lb/pg}^2$ .

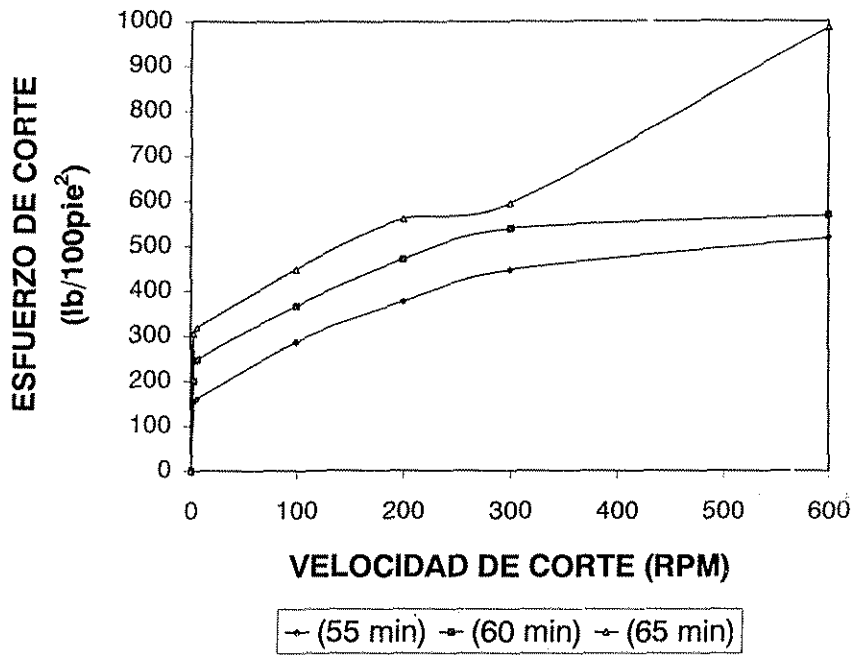


Figura 7-11 Comportamiento de la reología de 55 a 65 minutos en una lechada de cemento sin retardador  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 5,200 \text{ lb/pg}^2$ .

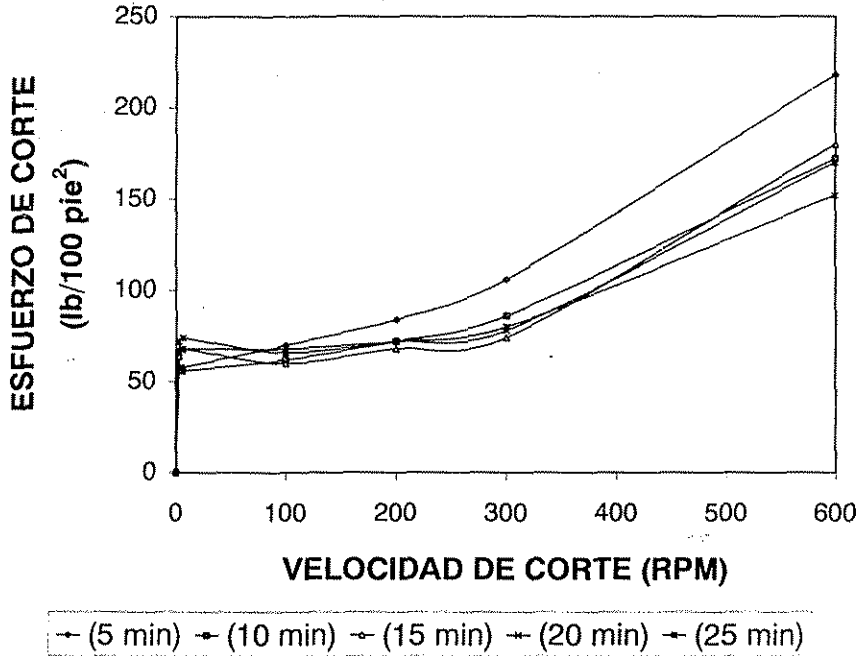


Figura 7-12 Comportamiento de la reología de 5 a 25 minutos de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador  $T_{max} = 138^{\circ}C$  y  $P_{max} = 6,200 \text{ lb/pg}^2$ .

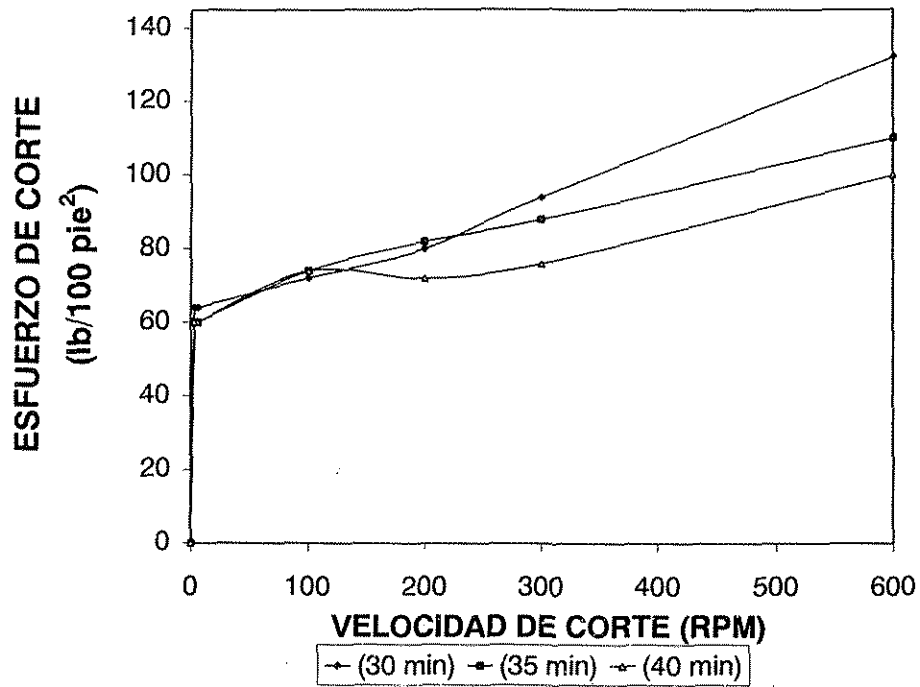


Figura 7-13 Comportamiento de la reología de 30 a 40 minutos de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador  $T_{max} = 138^{\circ}C$  y  $P_{max} = 6,200 \text{ lb/pg}^2$ .

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

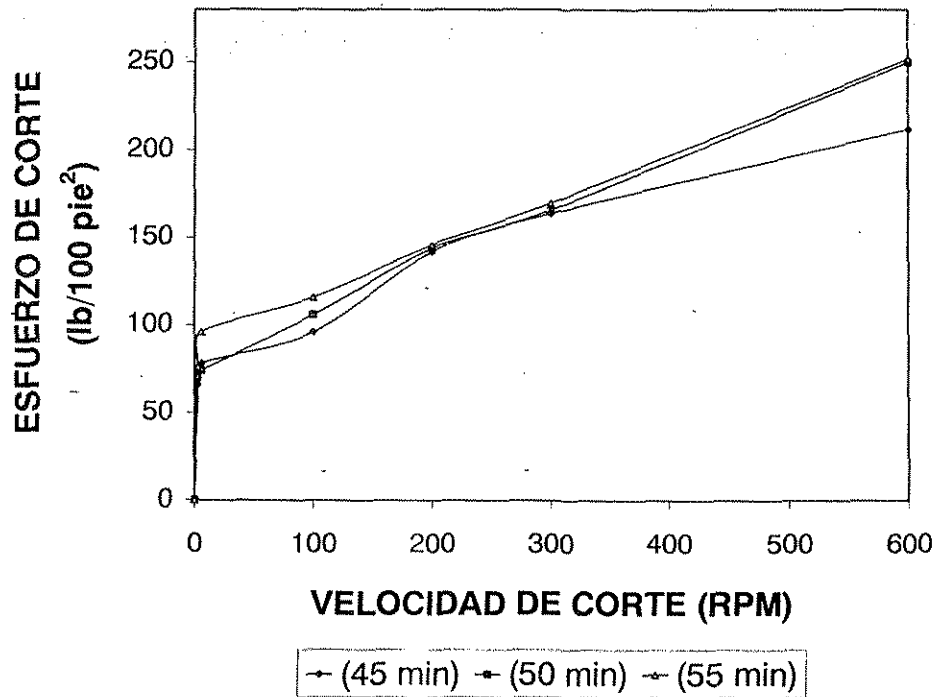


Figura 7-14 Comportamiento de la reología de 45 a 55 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador  $T_{max} = 138^{\circ}C$  y  $P_{max} = 6,200 \text{ lb/pg}^2$ .

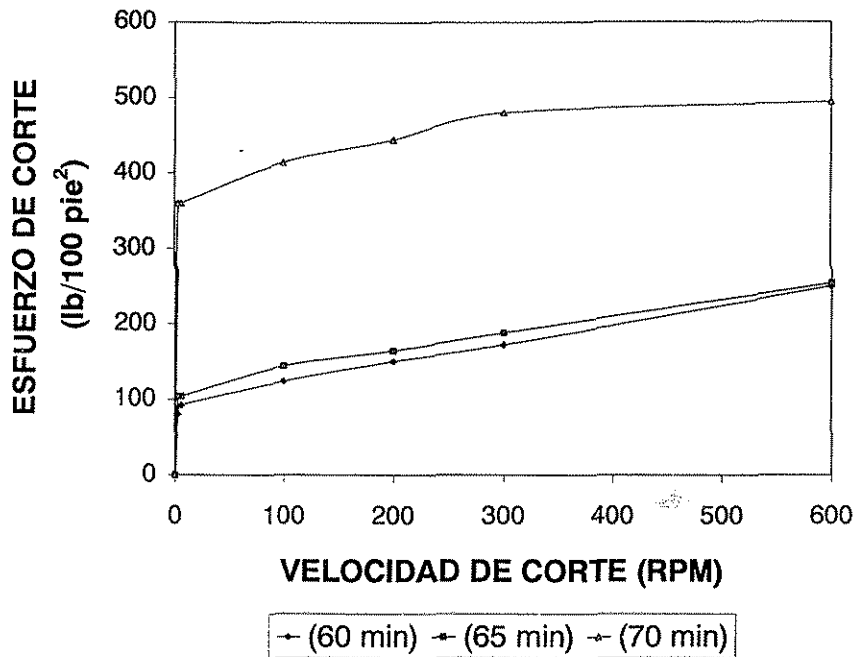


Figura 7-15 Comportamiento de la reología de 60 a 70 minutos a una lechada de cemento con 4.5 g de retardador  $T_{max} = 138^{\circ}C$  y  $P_{max} = 6,200 \text{ lb/pg}^2$ .

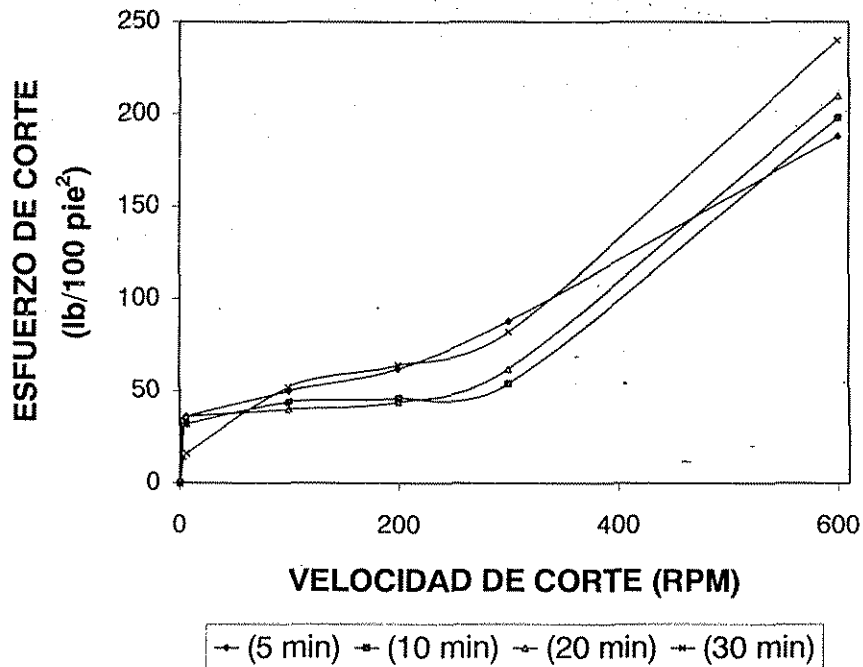


Figura 7-16 Comportamiento de la reología de 5 a 30 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador, cédula No. 31  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 12,000 \text{ lb/pg}^2$ .

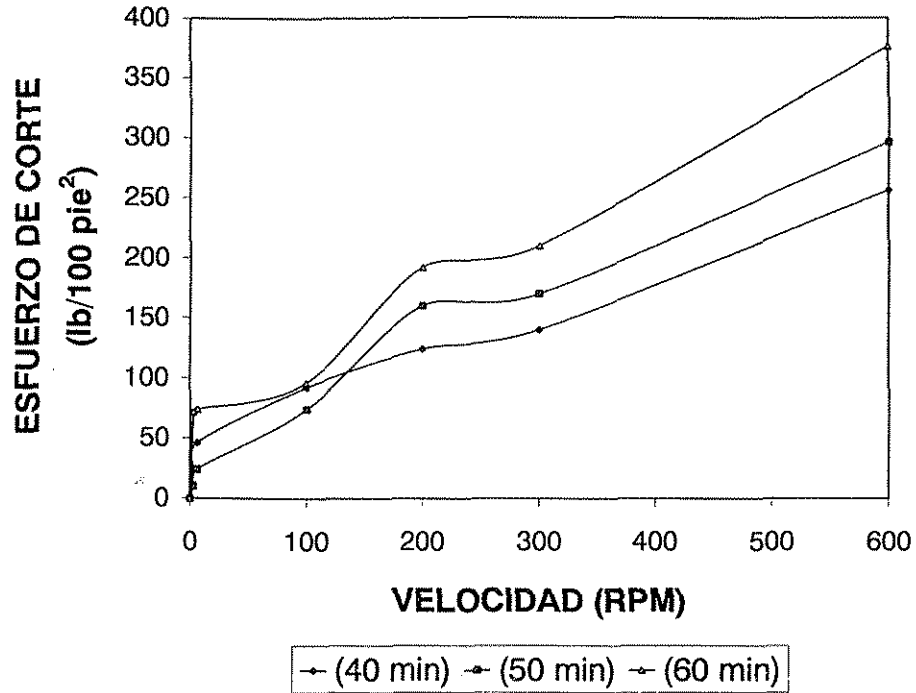


Figura 7-17 Comportamiento de la reología de 40 a 60 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador,  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 12,000 \text{ lb/pg}^2$ .

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

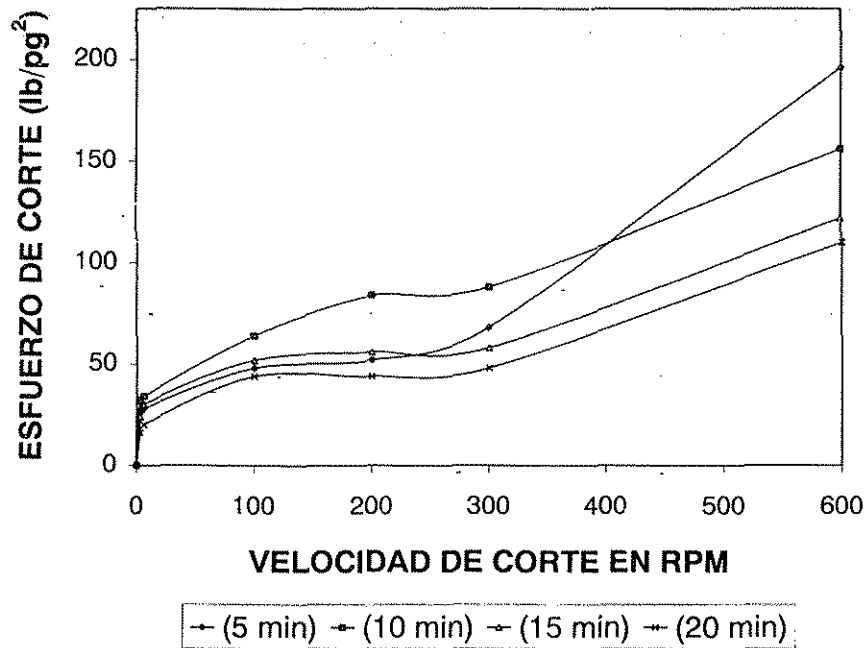


Figura 7-18 Comportamiento de la reología de 0 a 20 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador,  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 18,800 \text{ lb/pg}^2$ .

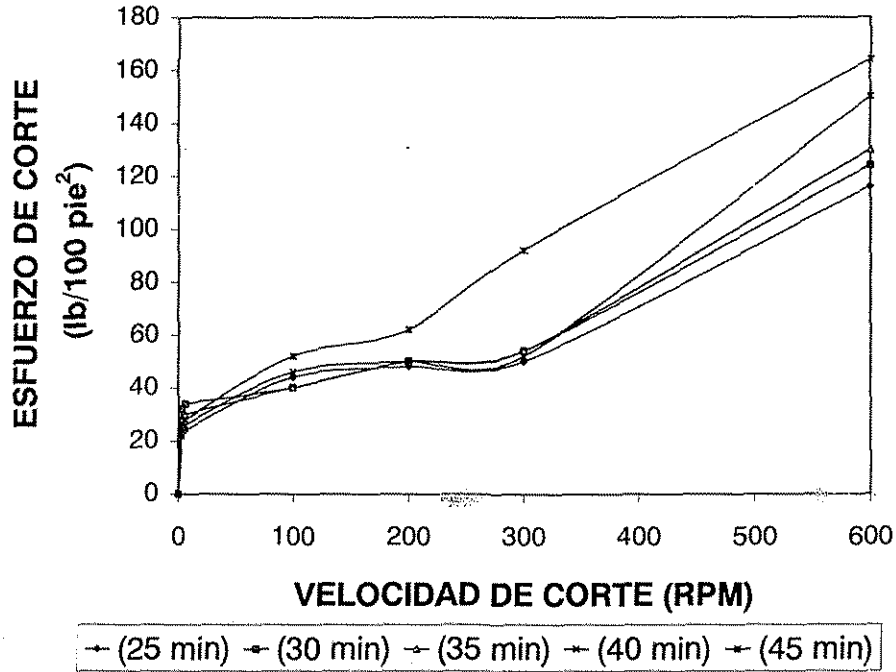


Figura 7-19 Comportamiento de la reología de 25 a 45 minutos en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador,  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 18,800 \text{ lb/pg}^2$ .

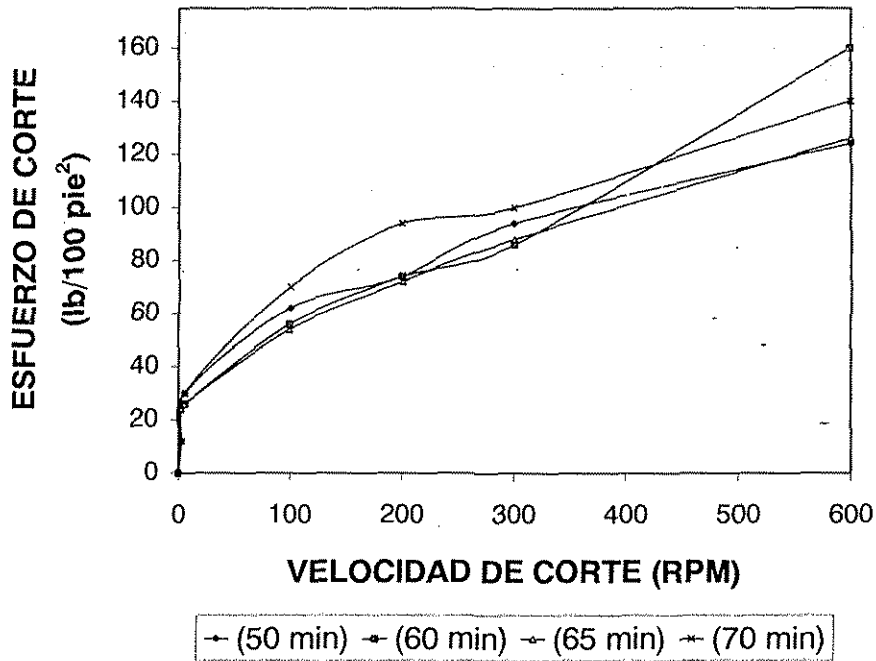


Figura 7-20 Comportamiento de la reología en una lechada de cemento con 4.5 g de retardador,  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 18,800 \text{ lb/pg}^2$ .

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

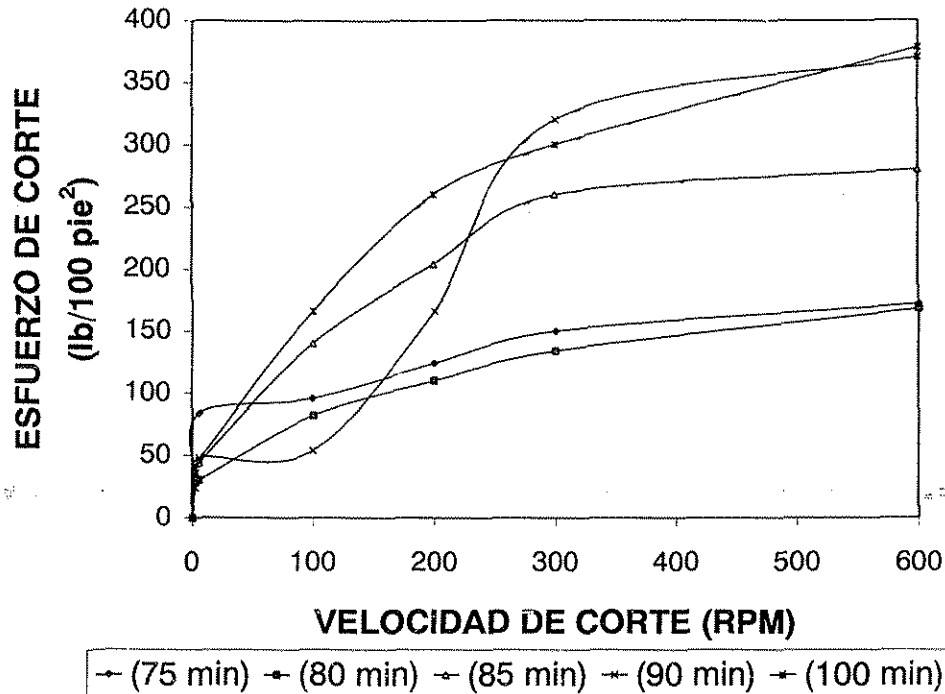


Figura 7-21 Comportamiento de la reología de una lechada de cemento con 4.5 g de retardador,  $T_{max} = 136^{\circ}C$  y  $P_{max} = 18,800 \text{ lb/pg}^2$ .

#### 7.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REOLÓGICAS.

Al analizar las Figuras 7-9 a 7-11 de la prueba No.1 se observa un incremento de los esfuerzos de corte en función del tiempo al aumentar la velocidad de corte a partir de las 300 RPM, dentro de este rango el modelo de ley de potencias podría representar el comportamiento de la reología a cada uno de los tiempos de medición de la prueba, sin embargo este modelo no está en función del tiempo, además ninguno de los modelos mostrados en la Figura 5-2 están en función del tiempo y la literatura técnica especializada en cementaciones menciona que este tipo de modelos se encuentra todavía en investigación. La prueba duró 65 minutos durante los cuales se efectuaron 11 mediciones reológicas, la anomalía que se observa entre los 200 y 300 RPM es producto de una inestabilidad reológica que se presenta en las lechadas de cemento por efecto de la reacción química de hidratación a la temperatura de  $52^{\circ}C$  y la presión de  $5,200 \text{ lb/pg}^2$  correspondientes a la cédula No.5 de la norma RP-10 del API, no se



continuó hasta el final del tiempo máximo de espesamiento por seguridad para el viscosímetro Fann 70 que como ya se mencionó debido a la naturaleza reactiva de la lechada de cemento esta puede fraguar y dejar pegadas las partes que constituyen la celda de prueba.

Al analizar las gráficas de la prueba No. 2 se observa una transformación en el comportamiento reológico de la lechada de cemento en el cual hasta los 25 minutos de la prueba se comporta como si fuera un fluido dilatante incluso con una tendencia de adelgazamiento de la lechada, es decir, una disminución de la viscosidad hasta este tiempo, que se atribuye a la alta temperatura  $136^{\circ}\text{C}$  o probablemente por un efecto de deslizamiento entre las partículas de la lechada, pero a partir de los 30 minutos se observa un cambio en el comportamiento de la lechada otra vez con un comportamiento reológico similar al del modelo de ley de potencias con un incremento viscoso que se acelera al final de la prueba dando la indicación de sacar la muestra de lechada del viscosímetro, que se retiró a los 70 minutos.

El cambio de un fluido dilatante a un seudoplástico representa una oscilación en el comportamiento de la lechada el cual es una característica de los fluidos viscosos.

Al analizar las gráficas de la prueba No.3 se observa otra vez una transformación en el comportamiento de la lechada de cemento en el cual hasta los 30 minutos de la prueba la lechada de cemento se comporta como si fuera un fluido dilatante pero a partir de los 40 minutos, se observa nuevamente el cambio del comportamiento con una tendencia hacia el modelo de ley de potencias, con las anomalías que se observan en la gráfica de la Figura 7-17.

Al analizar las gráficas de la prueba No. 4 se observa un comportamiento reológico con una disminución en la viscosidad que se podría representar con el modelo de ley de potencias hasta los primeros 20 minutos de la prueba. Se mantuvo este comportamiento en el intervalo de 25 a 45 minutos, se observó un incremento de los esfuerzos de corte y por lo tanto de la viscosidad, con una tendencia similar al modelo de ley de potencias entre los 50 y 70 minutos de la prueba y finalmente otro incremento de los esfuerzos con la misma tendencia al modelo de ley de potencias, observando una anomalía en la curva de 90 minutos. En esta prueba se efectuaron 18 mediciones reológicas en diferentes tiempos.

En general en todas las pruebas se observa un incremento del esfuerzo de corte en función del tiempo, fenómeno que también se registro en las pruebas de consistencia, al final de las pruebas se obtuvieron los valores más altos de los esfuerzos de corte, se observaron transformaciones en el comportamiento reológico de la lechada de dilatante a seudoplástico. A pesar del retardador se observó un incremento en la viscosidad de la lechada, que se atribuye a la presión y temperatura de las pruebas en función del tiempo, las cuales, aceleran la velocidad de la reacción química de hidratación de las lechadas de cemento.

En la Figura 7-22 se muestran los resultados de la prueba reológica No. 1 de una lechada de cemento en función del tiempo, sin retardador, en una gráfica tridimensional en donde se observa el comportamiento de los esfuerzos de corte contra la velocidad de corte y su variación en el tiempo, con las curvas completas de 5 a 65 minutos, siguiendo la cédula No. 5 con una temperatura máxima de 52°C y una presión de 5,200 lb/pg<sup>2</sup>. En esta Figura se observa como a medida que transcurre el tiempo de la prueba los esfuerzos de corte se incrementan a pesar del retardador y tiene un comportamiento creciente similar al modelo de ley de potencias que se incrementa en función del tiempo.

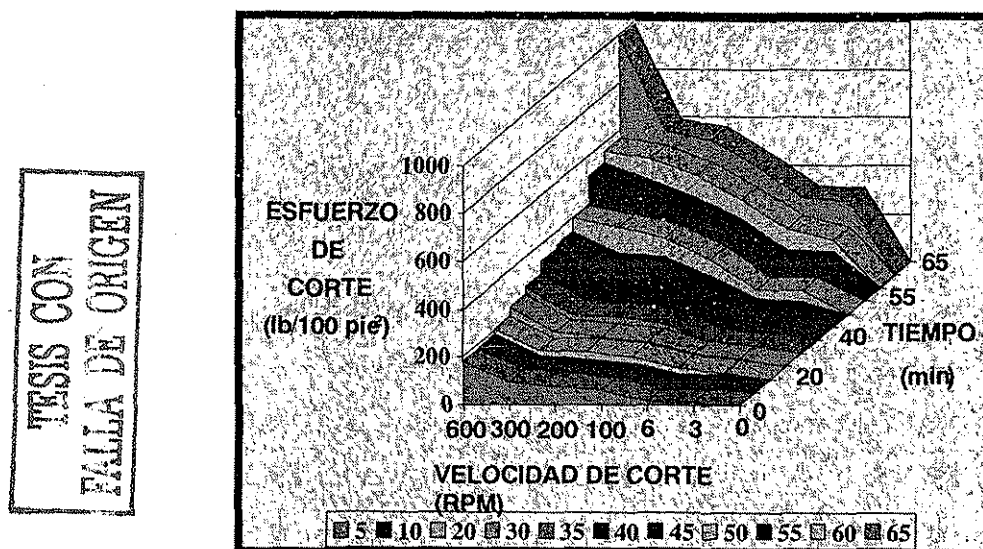
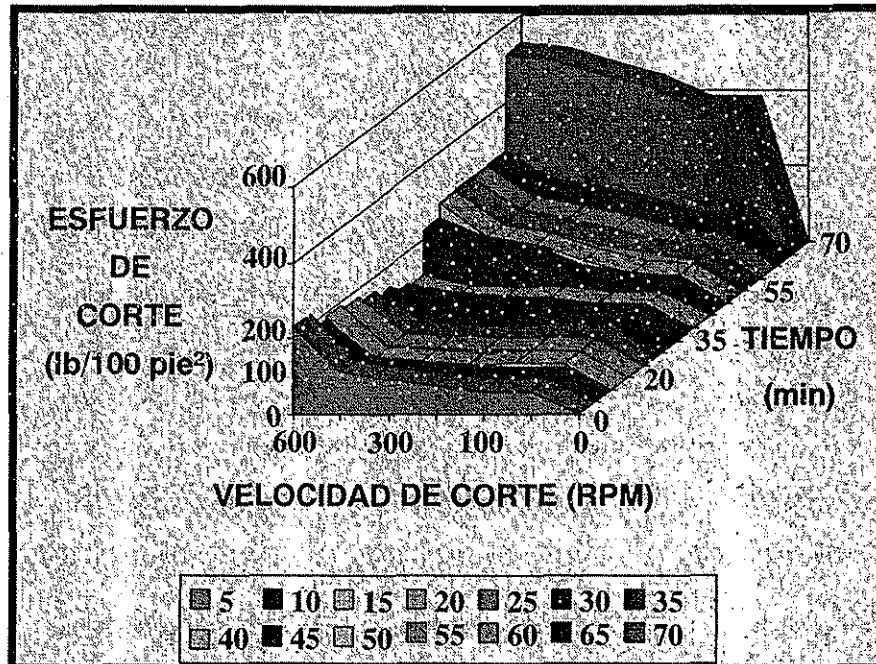


Figura 7-22 Prueba No. 1 Comportamiento de la reología de una lechada de cemento cédula No. 5, sin retardador en función del tiempo de 5 a 65 minutos a  $T_{\max}=52^{\circ}\text{C}$  y  $P_{\max}=5,200 \text{ lb/pg}^2$ .

En la Figura 7-23 se muestran los resultados de la prueba reológica No. 2 de una lechada de cemento en función del tiempo, con 4.5 g de retardador, en una gráfica tridimensional en donde se observa como el comportamiento de los esfuerzos de corte disminuye hasta los 40 minutos y después la lechada sufre una transformación con una tendencia al incremento de los esfuerzos de corte, observándose un incremento brusco de los esfuerzos a los 70 minutos. En esta figura se observa como además de presentar una tendencia al incremento de los esfuerzos de corte, la lechada de cemento sufre una transformación de sus propiedades reológicas debidas a la reacción química de hidratación por la presión y la temperatura a que se sometió durante la prueba.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 7-23 Prueba No. 2 Comportamiento de la reología de una lechada de cemento, con 4.5 g de retardador en función del tiempo de 5 a 70 minutos a  $T_{\max}=138^{\circ}\text{C}$  y  $P_{\max}=6,200 \text{ lb/pg}^2$ .

En la Figura 7-24 se muestran los resultados de la prueba reológica No. 3 de una lechada de cemento, con 4.5 g de retardador, en una gráfica tridimensional en función del tiempo, con una tendencia al incremento de los esfuerzos de corte de 0 a 60 minutos. En esta figura se puede observar como los esfuerzos se disparan a partir de una velocidad de corte de 300 RPM.

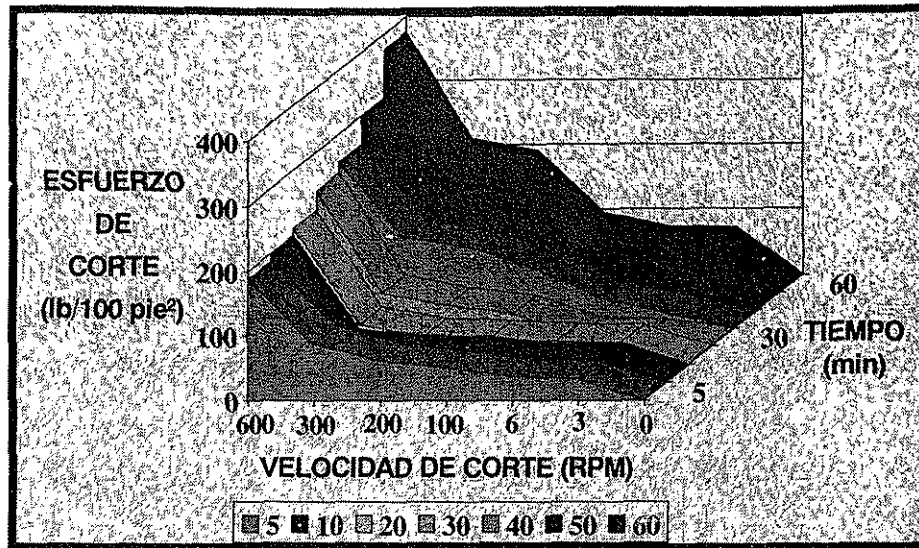


Figura 7-24 Prueba No. 3 Comportamiento de la reología de una lechada de cemento, con 4.5 g de retardador en función del tiempo de 5 a 60 minutos a  $T_{\max}=136^{\circ}\text{C}$  y  $P_{\max}=12,000 \text{ lb/pg}^2$ .

En la Figura 7-25 se muestran los resultados de la prueba reológica No. 4 de una lechada de cemento en función del tiempo, con 4.5 g de retardador, en una gráfica tridimensional en donde se observa el comportamiento de los esfuerzos de corte contra la velocidad de corte y su variación en el tiempo, con las curvas completas de 5 a 100 minutos, siguiendo la cédula No. 31 con una temperatura máxima de  $136^{\circ}\text{C}$  y una presión de  $18,800 \text{ lb/pg}^2$ . En esta Figura se observa como existe una transformación en el comportamiento de las propiedades reológicas de la lechada de cemento y a medida que transcurre el tiempo de la prueba los esfuerzos de corte se incrementan a partir del minuto 75 a pesar del retardador y tiene un comportamiento creciente similar al modelo de ley de potencias que se incrementa en función del tiempo, transformándose de un fluido dilatante a un seudoplástico, debido a que la reacción de hidratación va transformando la estructura de la gel de la lechada, incrementando su viscosidad hasta pasar de líquido a sólido.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

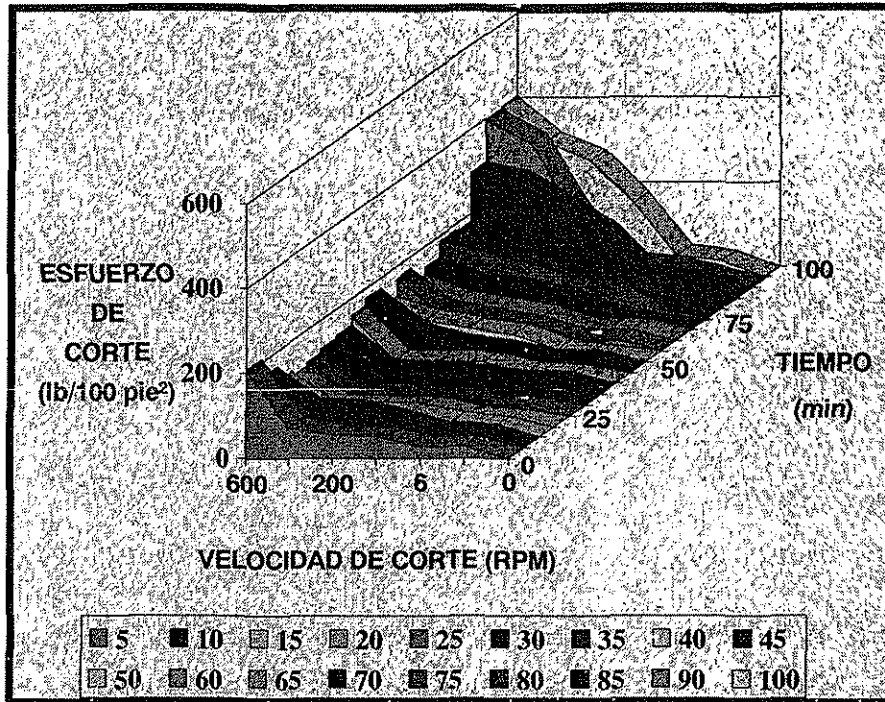


Figura 7-25 Prueba No. 4 Comportamiento de la reología de una lechada de cemento, con 4.5 g de retardador, cedula 31 en función del tiempo de 5 a 100 minutos a  $T_{\max}=136^{\circ}\text{C}$  y  $P_{\max}=18,800$  lb/pg<sup>2</sup>.

En el siguiente capítulo se ajustará un modelo reológico en función del tiempo basado en las pruebas experimentales que incluye como variables la presión y la temperatura. Los pozos de la Región Sur pueden presentar alguna de las combinaciones de presión y temperatura de las pruebas realizadas, en donde a pesar de los aditivos se manifiesta un incremento de los esfuerzos de corte y por tanto de la viscosidad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**CAPITULO 8 AJUSTE DEL MODELO REOLÓGICO.**

Para efectuar el ajuste del modelo reológico de las lechadas de cemento a condiciones de alta presión y temperatura se realizaron dos tipos de pruebas en el laboratorio, las pruebas experimentales realizadas con el consistómetro de alta presión y temperatura, de las cuales se presentaron los resultados en el capítulo 6, y las pruebas reológicas realizadas con el viscosímetro Fann 70 para alta presión y temperatura presentadas en el capítulo 7. De las pruebas con el consistómetro se obtuvo como resultados el comportamiento de las lechadas de cemento sometidas a tres diferentes niveles de presión 6,000, 12,000 y 18,800 lb/pg<sup>2</sup> y a la temperatura de 136°C encontrada en los pozos de la Región Sur<sup>1,9</sup>. Con estas pruebas se determinó la concentración y el tipo de retardador necesarios para poder obtener un tiempo máximo de espesamiento, el cual, aseguró el tiempo necesario para efectuar las pruebas reológicas, sin tener problemas de fraguado que hicieran peligrar la integridad de la celda de prueba del viscosímetro Fann 70.

Para diseñar el modelo reológico en función del tiempo a las condiciones de presión y temperatura de la Región Sur se analizó el comportamiento de las variables que intervinieron en las pruebas experimentales, las cuales se presentan a continuación.

- Velocidad de Corte (variable independiente 3,6,100,200,300 y 600 RPM).
- Concentración de retardador (fija 4.5 g correspondiente al 0.52% en peso).
- Agua destilada (fija en la formulación de la lechada 327g).
- Cemento tipo H (fijo en la formulación de la lechada 860 g).
- Presión (variable independiente en tres niveles 6000, 12000 y 18800 lb/pg<sup>2</sup>)
- Temperatura (fija, promedio correspondiente al asentamiento de las tuberías de explotación en la Región Sur  $T_{max}=136^{\circ}C$ ) cédula 31 del API.
- Tiempo (variable independiente en minutos).
- Esfuerzo de Corte (variable dependiente en lb/100 pie<sup>2</sup>)

Durante las pruebas se registro la presión, temperatura, tiempo y esfuerzo de corte a diferentes velocidades de corte, tratando de simular en el laboratorio las condiciones de presión y temperatura encontradas en los pozos de la Región Sur, observando y analizando el comportamiento reológico, para estructurar un modelo reológico en función del tiempo y reproducir el comportamiento observado durante las pruebas.

El ajuste matemático del modelo reológico se realizó mediante un análisis estadístico de regresión y varianza<sup>11</sup>, usando los software SPSS 8.0 y STATISTICA 5.1, para determinar la relación funcional entre el esfuerzo de corte y la velocidad, considerando el ajuste de estos parámetros en función del tiempo con tres diferentes niveles de presión 6,200, 12,000 y 18,800 lb/pg<sup>2</sup> y a la temperatura de 136°C que como ya se mencionó podemos encontrar en los pozos de la Región Sur.

Dado el comportamiento reológico que se obtuvo como resultado en las pruebas se aplicó el modelo de ley de potencias y se ajustó en función del tiempo para los tres niveles de presión. Como resultado del análisis estadístico con el software mencionado, se obtuvo el modelo reológico para las lechadas de cemento en función del tiempo, donde el índice de consistencia del fluido K y el índice de comportamiento de flujo n, se expresaron como dos relaciones en función del tiempo, reflejando con esto que las lechadas de cemento tienen una composición y estructura molecular que sufre transformaciones en función del tiempo a pesar de los aditivos retardantes. En este trabajo las designamos como  $\alpha(t)$  y  $\beta(t)$ , hasta el momento desconocidas, pero cuya relación se obtuvo con el análisis estadístico de una relación no lineal obtenida con los resultados de las pruebas reológicas aplicada a tres niveles de presión 6,200,12,000 y 18,800 lb/pg<sup>2</sup> y la temperatura de 136°C. El análisis estadístico, los resultados obtenidos con el software y el procedimiento para el ajuste del modelo reológico se presentan en el análisis estadístico para el ajuste del modelo reológico.

## 8.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL AJUSTE DEL MODELO REOLÓGICO.

El objetivo del análisis estadístico fue determinar la relación funcional entre las variables involucradas en las pruebas reológicas de las lechadas de cemento sometidas a altas condiciones de presión y temperatura para simular los efectos que tienen las lechadas durante la cementación de las tuberías de revestimiento de explotación en los pozos de la Región Sur. La reología establece el comportamiento entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, el esfuerzo de corte se consideró como la variable dependiente y la velocidad de corte como la variable independiente.

Estableciendo una primera relación entre estas variables tenemos la siguiente expresión:  $\tau_i = f(\gamma, \dot{t})$  para  $P_i$  con  $i = 1...3$  y  $T$  donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte,  $\gamma$  es la velocidad de corte,  $\dot{t}$  es el tiempo,  $P_i$  es la presión para tres niveles y  $T$  la temperatura en el asentamiento de las tuberías de explotación en yacimientos de la Región Sur.

Se efectuó un análisis estadístico para obtener una correlación entre las variables de las pruebas reológicas usando un método de regresión no lineal, también se realizó un análisis estadístico de varianza<sup>11</sup> usando el software STATÍSTICA 5.1 y SPSS 8.0 para Windows, dado el comportamiento de las pruebas reológicas se seleccionó como modelo matemático el modelo Ostwald de Wale o Ley de Potencias para ajustarlo en función del tiempo. Recordemos que este modelo de la viscosidad, es función de la velocidad de corte y de los parámetros  $K$  y  $n$  que son funciones del fluido analizado, su expresión matemática se presenta en la ecuación 8.1.

$$\tau = K\gamma^n \dots (8.1)$$

donde:

$K$  = es el índice de consistencia del fluido.

$n$  = es el índice de comportamiento de flujo, es decir, el grado de desviación del comportamiento Newtoniano.

Como se puede observar  $K$  y  $n$  son parámetros que dependen de la composición y estructura molecular de la lechada de cemento<sup>12</sup> y a su vez son dependientes del tiempo por lo tanto se pueden establecer dos funciones  $\alpha(\dot{t})$  y  $\beta(\dot{t})$  que se obtendrán



mediante el análisis estadístico de regresión no lineal de los resultados de las pruebas experimentales en función del tiempo, para tres niveles de presión diferentes 6,200, 12,000 y 18,800 lb/pg<sup>2</sup>.

Debido a que la prueba reológica No. 1 se efectuó a bajas condiciones de presión y temperatura 5,200 lb/pg<sup>2</sup> y 52°C respectivamente, no se incluyó en el ajuste del modelo, sin embargo sirvió de comparación en el comportamiento reológico de las pruebas 2, 3 y 4 usadas en el ajuste del modelo reológico en función del tiempo.

Se realizó la conversión de los datos de la velocidad de corte en rpm afectándola, por 1.703 para obtener seg<sup>-1</sup>, de la misma manera los esfuerzos de corte se afectaron por 1.067 para obtener las lecturas del esfuerzo de corte en lb/100 pie<sup>2</sup>

Los resultados de la prueba No. 2 para el primer nivel de presión 6,200 lb/pg<sup>2</sup> y una temperatura de 136°C se presentan en la Tabla 8-1.

VELOCIDAD DE CORTE	PRUEBA No. 2													
	T <sub>max</sub> =138°C P <sub>max</sub> =6,200 psi Esfuerzo de Corte en lb/100 pie <sup>2</sup>													
	Tiempo (minutos)													
seg <sup>-1</sup>	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
1021.8	233	184	192	181	162	141	117	107	226	267	269	267	271	527
510.9	113	91.8	79	83.2	85.4	100	93.9	81.1	175	177	181	184	201	512
340.6	89.6	76.8	72.6	76.8	76.8	85.4	87.5	76.8	152	154	156	160	175	474
170.3	74.7	66.2	64	72.6	70.4	76.8	79	79	102	113	124	132	154	442
10.218	61.9	59.8	72.6	72.6	79	68.3	64	64	83.2	79	102	98.2	111	384
5.109	61.9	59.8	68.3	70.4	76.8	68.3	64	64	70.4	74.7	81.1	85.4	111	384
TEMPERATURA (°C)	32	48	75	96	105	111	130	136	136	136	136	137	138	138
PRESIÓN (lb/pg <sup>2</sup> )	500	1500	4300	6250	6500	6250	5900	6000	6200	6000	6200	6200	6200	6200

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 8-1 Reología de una lechada de cemento, en función del tiempo para el primer nivel de presión 6,200 lb/pg<sup>2</sup> y una temperatura de 138°C

Para el primer nivel de presión 6,200 lb/pg<sup>2</sup> se asociaron los parámetros dependientes del tiempo  $\alpha$  y  $\beta$  a cada uno de los tiempos de prueba, donde se realizaron las mediciones reológicas quedando de la siguiente manera:

$$\alpha_5, \alpha_{10}, \alpha_{15}, \alpha_{20}, \alpha_{25}, \alpha_{30}, \alpha_{35}, \alpha_{40}, \alpha_{45}, \alpha_{50}, \alpha_{55}, \alpha_{60}, \alpha_{65} \text{ y } \alpha_{70}$$

$$\beta_5, \beta_{10}, \beta_{15}, \beta_{20}, \beta_{25}, \beta_{30}, \beta_{35}, \beta_{40}, \beta_{45}, \beta_{50}, \beta_{55}, \beta_{60}, \beta_{65} \text{ y } \beta_{70}$$

Con los datos reológicos de la prueba No. 2 y usando como base la ecuación del modelo de Ley de potencias se desarrollo la siguiente expresión como función de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  a las condiciones de presión y temperatura quedando de la siguiente manera

$$\tau = \alpha(t) \gamma^{\beta(t)} \dots\dots\dots 8.2$$

## 8.2 OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES $\alpha(t)$ y $\beta(t)$ PARA EL PRIMER NIVEL DE PRESIÓN.

A continuación se procedió a obtener los valores de  $\alpha(t)$  y  $\beta(t)$  mediante el software STATÍSTICA 5.1. Con los valores de la prueba No. 2 se realizó un análisis de regresión cúbica corriendo los datos en este software estadístico, los resultados de la prueba para obtener  $\alpha$  y  $\beta$  a cada uno de los tiempos, la proporción de varianza y la regresión para el primer nivel de presión, (6,200 lb/pg<sup>2</sup> y 138°C), arrojaron los resultados que se presentan en la Tabla 8-2.

TIEMPO (min)	ALFA	BETA	PROPORCIÓN DE VARIANZA	R
5	6.3356	0.488808	0.688429	0.829716
10	19.5119	0.276844	0.585167	0.764962
15	28.1544	0.215307	0.372424	0.610265
20	35.2768	0.177895	0.405749	0.636984
25	48.2402	0.117043	0.319523	0.565263
30	43.3090	0.134374	0.679783	0.824489
35	45.4431	0.112710	0.865114	0.930115
40	45.4431	0.112710	0.742479	0.861673
45	35.6683	0.246281	0.899009	0.948161
50	25.5031	0.295969	0.881290	0.938770
55	41.7771	0.238283	0.836175	0.914426
60	44.34169	0.230310	0.869385	0.932408
65	65.2553	0.173747	0.819645	0.905343
70	65.2553	0.173747	0.819650	0.905340

Tabla 8-2 Resultado de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos por regresión cúbica para el primer nivel de presión 6,200 lb/pg<sup>2</sup>.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Donde las alfa y las beta son los coeficientes de regresión cúbica obtenidos con el software STATISTICA 5.1, la regresión, es una técnica estadística que se utiliza para predecir o estimar los valores de una variable desconocida en base a los valores conocidos o supuestos de otras variables y se usan para explicar las relaciones entre las variables de un experimento. Los datos de la proporción de varianza y las R son estimadores estadísticos de la regresión, que reflejan la magnitud de dispersión de las variables de regresión respecto a los datos experimentales y se obtienen cuando se realiza un análisis de varianza<sup>11</sup>, para obtener los valores de variables desconocidas en un experimento. En la Tabla 8-2 se muestran los valores de alfa y beta en función de un tiempo puntual de la prueba, obtenidos con el software STATISTICA 5.1. Procediendo a su generalización en función del tiempo se hizo una correlación similar para determinar la relación funcional de las variables  $\alpha$  y  $\beta$  utilizando el software SSPS 8.0, para determinar la curva que se ajusta al tipo de comportamiento observado en las pruebas, el cual obedeció a un comportamiento cúbico. Corriendo los valores de alfa y beta presentados en la tabla 8-2 en el software SSPS se obtuvieron los coeficientes respectivos  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  y  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  en función ya no de un tiempo específico, sino de un tiempo en general para  $\alpha$  y  $\beta$ , dando como resultado las ecuaciones 8.3 y 8.4.

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 \dots\dots\dots 8.3$$

en donde:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0.735017 \\ \alpha_1 &= -0.255193 \\ \alpha_2 &= 0.014113 \\ \alpha_3 &= -0.735017 \end{aligned}$$

$$\beta(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 \dots\dots\dots 8.4$$

donde:

$$\begin{aligned} \beta_0 &= 0.844488 \\ \beta_1 &= 0.087578 \\ \beta_2 &= -0.003767 \\ \beta_3 &= 3.784722 * 10^{-5} \end{aligned}$$

Sustituyendo las ecuaciones 8.3 y 8.4 en la ecuación 8.2 el modelo propuesto en función del tiempo para un nivel determinado de presión y la temperatura de prueba es el siguiente:

$$\tau = (\alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3) \gamma^{(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3)} \dots 8.5$$

Para cada nivel de presión, serán sustituidos los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  en función del tiempo.

### 8.3 OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES $\alpha(t)$ y $\beta(t)$ PARA EL SEGUNDO NIVEL DE PRESIÓN.

Para la obtención del modelo con el segundo nivel de presión 12,000 lb/pg<sup>2</sup> y una temperatura de 136°C, se procedió en forma similar. Los datos de las pruebas realizadas en la lechada de cemento con el viscosímetro de alta presión y temperatura se presentan en la Tabla 8-3.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

VELOCIDAD DE CORTE	PRUEBA No. 3						
	T <sub>max</sub> =136°C P <sub>max</sub> =12,000 psi Esfuerzo de Corte en lb/100pie <sup>2</sup>						
	Tiempo (minutos)						
seg <sup>-1</sup>	5	10	20	30	40	50	60
1021.8	200.6	211.27	224.07	256.08	273.15	315.8	401.19
510.9	93.896	57.618	66.154	87.494	149.38	181.4	224.07
340.6	66.154	49.082	46.948	68.288	132.31	170.7	204.86
170.3	53.35	46.948	42.68	55.484	98.164	78.96	102.43
10.218	38.412	34.144	38.412	17.072	49.082	25.61	78.958
5.109	36.278	34.144	36.278	14.938	25.608	10.67	76.824
TEMPERATURA (°C)	35	68	105	112	122	136	136
PRESIÓN (lb/pg <sup>2</sup> )	200	4100	6200	8200	11600	12000	12000

Tabla 8-3 Reología de una lechada de cemento, en función del tiempo a condiciones de 136°C para el segundo nivel de presión de 12,000 lb/pg<sup>2</sup>.

Se asociaron los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  dependientes del tiempo a cada uno de los tiempos de la prueba donde se realizaron las mediciones reológicas quedando de la siguiente manera:

$$\alpha_0, \alpha_{10}, \alpha_{20}, \alpha_{30}, \alpha_{40}, \alpha_{50}, \alpha_{60},$$

$$\beta_{05}, \beta_{10}, \beta_{20}, \beta_{30}, \beta_{40}, \beta_{50}, \beta_{60},$$

Se procedió a obtener los valores de  $\alpha(t)$  y  $\beta(t)$  para la prueba No. 3 y se realizó nuevamente un análisis de regresión cúbica, de donde se obtuvo los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  para cada uno de los tiempos, la proporción de varianza y los datos de la regresión obtenidos se muestran en la Tabla 8-4.

TIEMPO (min)	ALFA	BETA	PROPORCIÓN DE VARIANZA	R
5	0.525836	0.842444	0.854047	0.924147
10	0.013585	1.380146	0.844277	0.918845
20	0.013585	1.380146	0.863574	0.929287
30	0.055792	1.204238	0.958490	0.979025
40	5.126332	0.555248	0.949322	0.974332
50	2.710806	0.676107	0.984424	0.992181
60	2.71806	0.676107	0.865114	0.942999

Tabla 8-4 Resultado de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos por regresión cúbica para el segundo nivel de presión 12,000 lb/pg<sup>2</sup> y una temperatura de 136°C.

Se realizó la correlación para obtener las variables  $\alpha$  y  $\beta$  con el software STATISTICA 5.1 para cada tiempo de la prueba, y se determinó el tipo de curva, el cual se ajustó a el comportamiento de las ecuaciones 8-3 y 8.4. A partir de los valores de alfa y beta de la tabla 8-4, se obtuvieron los coeficientes respectivos  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  y  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  para  $\alpha$  y  $\beta$ , con el uso del software SSPS 8.0 en función de un tiempo general, obteniendo el siguiente resultado.

$\alpha_0 = -20.818616$   
 $\alpha_1 = 5.594060$   
 $\alpha_2 = -0.156265$   
 $\alpha_3 = 0.001356$   
 $\beta_0 = 0.687218$   
 $\beta_1 = -0.049559$   
 $\beta_2 = 0.001341$   
 $\beta_3 = -1.062960 * 10^{-5}$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Por lo tanto, los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  pueden ser sustituidos en la ecuación 8.5 para el segundo nivel de presión.

### 8.4 OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES $\alpha(t)$ y $\beta(t)$ PARA EL TERCER NIVEL DE PRESIÓN.

Finalmente se siguió el mismo procedimiento para el tercer nivel de presión 18,800 lb/pg<sup>2</sup> procediendo en forma similar de acuerdo a los datos de las pruebas que se presentan en la Tabla 8-5.

VELOCIDAD DE CORTE	PRUEBA No. 4																	
	T <sub>max</sub> =136°C P <sub>max</sub> =18,800 psi Esfuerzo de Corte en lb/100 pie <sup>2</sup>																	
	Tiempo (minutos)																	
seg <sup>-1</sup>	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	65	70	75	80	85	90	100
1021.8	209	166	130	117	124	132	139	160	175	132	171	134	149	184	179	299	395	403.3
510.9	73	94	62	51	53.4	57.6	57.6	55.5	98.2	100	91.8	93.9	107	160	143	277	341	320.1
340.6	55	90	60	47	51.2	53.4	53.4	53.4	66.2	79	79	76.8	100	132	117	218	177	277.4
170.3	51	68	55	47	46.9	42.7	42.7	49.1	55.5	66.2	59.8	57.6	74.7	102	87.5	149	57.6	177.1
10.218	30	36	32	21	25.6	36.3	32	27.7	29.9	32	27.7	27.7	32	89.6	32	46.9	51.2	49.08
5.109	28	34	26	17	23.5	34.1	29.9	23.5	27.7	12.8	25.6	25.6	12.8	32	34.1	38.4	25.6	38.41
TEMPERATURA (	40	67	94	115	120	130	135	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136
°PRESIÓN	1500	3000	5000	7000	10000	16100	17200	18200	19500	13800	18800	18800	18800	18800	18800	18800	18800	18800

Tabla 8-5 Reología de una lechada de cemento, con la cédula 31 API en función del tiempo para el tercer nivel de presión de 18,800 lb/pg<sup>2</sup> a una temperatura de 136°C

Se asociaron los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  dependientes del tiempo a cada uno de los tiempos de la prueba y se realizaron las mediciones reológicas quedando de la siguiente manera:

$\alpha_5, \alpha_{10}, \alpha_{15}, \alpha_{20}, \alpha_{25}, \alpha_{30}, \alpha_{35}, \alpha_{40}, \alpha_{45}, \alpha_{50}, \alpha_{60}, \alpha_{65}$  y  $\alpha_{70}$   $\alpha_{75}, \alpha_{80}, \alpha_{85}, \alpha_{90}$  y  $\alpha_{100}$ ,  
 $\beta_5, \beta_{10}, \beta_{15}, \beta_{20}, \beta_{25}, \beta_{30}, \beta_{35}, \beta_{40}, \beta_{45}, \beta_{50}, \beta_{60}, \beta_{65}, \beta_{70}, \beta_{75}, \beta_{80}, \beta_{85}, \beta_{90}$  y  $\beta_{100}$

Se procedió a obtener los valores de  $\alpha(t)$  y  $\beta(t)$  para la prueba No. 4 en cada uno de los tiempos, la proporción de varianza y los datos de la regresión obtenidos al correr el software STATISTICA 5.1 se muestran en la Tabla 8-6.

TIEMPO (min)	ALFA	BETA	PROPORCIÓN DE VARIANZA	R
5	0.068714	1.143960	0.88717	0.94189
10	9.008081	0.395426	0.90327	0.95040
15	6.488377	0.399908	0.80311	0.89617
20	1.9472	0.566065	0.845392	0.919425
25	2.355455	0.543893	0.794751	0.891488
30	3.789168	0.478702	0.657827	0.811065
35	0.957803	0.695755	0.747949	0.864840
40	0.238631	0.921551	0.822459	0.906895
45	1.619278	0.659211	0.911633	0.954794
50	8.84429	0.378060	0.983413	0.991671
60	2.981096	0.564684	0.930621	0.964687
65	8.054187	0.388979	0.969478	0.984620
70	9.814492	0.381469	0.988637	0.994302
75	32.04525	0.239853	0.893632	0.945321
80	13.53574	0.363040	0.994791	0.997392
85	9.814492	0.381469	0.972440	0.986124
90	3.308432	0.689416	0.897221	0.947217
100	19.53218	0.431939	0.991520	0.995751

Tabla 8-6 Resultado de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos por regresión cúbica de las pruebas reológicas para el tercer nivel de presión 18,800 lb/pg<sup>2</sup> y una temperatura de 136°C.

Se siguió el mismo procedimiento para obtener la relación funcional de las variables  $\alpha$  y  $\beta$  a cada tiempo de la prueba. La correlación obedece al comportamiento de las ecuaciones 8.3 y 8.4. Corriendo los valores de alfa y beta presentados en la tabla 8-2 en el software SSPS se obtuvieron los coeficientes respectivos  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  y  $\beta_0,$

$\beta_1$ ,  $\beta_2$ , y  $\beta_3$  en función ya no de un tiempo específico, sino de un tiempo en general para  $\alpha$  y  $\beta$ , dando el siguiente resultado:

$$\alpha_0 = 7.880932$$

$$\alpha_1 = -0.508696$$

$$\alpha_2 = 0.012867$$

$$\alpha_3 = -7.0799 \times 10^{-5}$$

$$\beta_0 = 0.757288$$

$$\beta_1 = -0.006278$$

$$\beta_2 = 1.124256 \times 10^{-5}$$

$$\beta_3 = 2.162115 \times 10^{-7}$$

Al sustituir estos valores de  $\alpha$  y  $\beta$  en la ecuación 8-5 se puede obtener la ecuación para el tercer nivel de presión.

En general el modelo consta de una relación funcional de las variables  $\alpha$  y  $\beta$  dependiente del tiempo con valores específicos de estas variables para los tres diferentes niveles de presión. En la Tabla 8-7 se presentan estos valores para cada nivel de presión de acuerdo a los datos de las pruebas reológicas.

FUNCIONES DEL TIEMPO	COEFICIENTES ( $\alpha$ y $\beta$ )	PRIMER NIVEL (6000 lb/pg <sup>2</sup> )	SEGUNDO NIVEL (12000 lb/pg <sup>2</sup> )	TERCER NIVEL (18000 lb/pg <sup>2</sup> )
$\alpha(t)$	$\alpha_0$	0.735017	-20.818616	7.880932
	$\alpha_1$	-0.255193	5.594060	-0.508696
	$\alpha_2$	0.014113	-0.156265	0.012867
	$\alpha_3$	-0.735017	0.001356	$-7.0799 \times 10^{-5}$
$\beta(t)$	$\beta_0$	0.844488	0.687218	0.757288
	$\beta_1$	0.087578	-0.049559	-0.006278
	$\beta_2$	-0.003767	0.001341	$1.124256 \times 10^{-5}$
	$\beta_3$	$3.784722 \times 10^{-9}$	$-1.062960 \times 10^{-5}$	$2.162115 \times 10^{-7}$

**8-7 Coeficientes de regresión  $\alpha$  y  $\beta$  para los tres niveles de presión del modelo.**

El análisis de varianza comprende la respuesta experimental descomponiéndola en porciones independientes y significativas de los datos experimentales, considerando que el modelo sea aceptable si este nos proporciona un error máximo del 5%.



Se aplicó un intervalo de confianza del 95% que marcará la región de aceptación, planteando las siguientes hipótesis:

Si  $H_0 = \alpha_0 = \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \dots, \alpha_n = 0$ , entonces: Las propiedades reológicas son independientes del tiempo.

Si  $H_1 =$  Al menos una  $\alpha_i$  es diferente de cero, entonces: Las propiedades reológicas son dependientes del tiempo.

El criterio para decidir si la hipótesis describe adecuadamente los datos es empleando el parámetro conocido como estadístico de Fisher<sup>11</sup> que se presenta en la ecuación (8-6).

$$F_0 = SSR/MSE \quad (8-6)$$

Donde:

SSR= suma de los cuadrados de la regresión.

MSE= media de los cuadrados del error.

Si  $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tablas}}$ , se acepta la hipótesis nula  $H_0$ . En la Tabla 8-8 se presentan estos dos parámetros estadísticos para los tres niveles de presión 6,200, 12,000 y 18,800 lb/pg<sup>2</sup>.

Nivel de Presión	Coefficientes	$F_{\text{calculado}}$	$F_{\text{tablas}}$	Hipótesis nula $H_0$	Hipótesis No nula $H_1$
6,200 psi	Alfa	2.01035	0.2904	se rechaza	Se acepta
	Beta	10.35070	0.0432	se rechaza	Se acepta
12,000 psi	Alfa	23.70462	0.0001	se rechaza	Se acepta
	Beta	24.57760	0.0001	se rechaza	Se acepta
18,800 psi	Alfa	2.62247	0.0916	se rechaza	Se acepta
	Beta	1.09967	0.3820	se rechaza	Se acepta

Tabla 8-8 Criterio de aceptación de las hipótesis  $H_0$  y  $H_1$  para los tres niveles de presión.

por tanto se concluye que el modelo describe adecuadamente los datos de las propiedades reológicas en función del tiempo.

La Figura 8-1 muestra la gráfica del modelo para la prueba del tercer nivel de presión y un tiempo de 100 minutos. Utilizando los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  en función del tiempo, se puede observar el ajuste del modelo y la ecuación 8-7 específica del modelo para el tercer nivel de presión.

$$\tau = (7.8809 - 0.5086t + 0.0129t^2 - 0.000071t^3) \gamma^{(0.75 - 0.0063t + 1.124t^2 + 2.16 \cdot 10^{-7}t^3)} \quad (8-7)$$

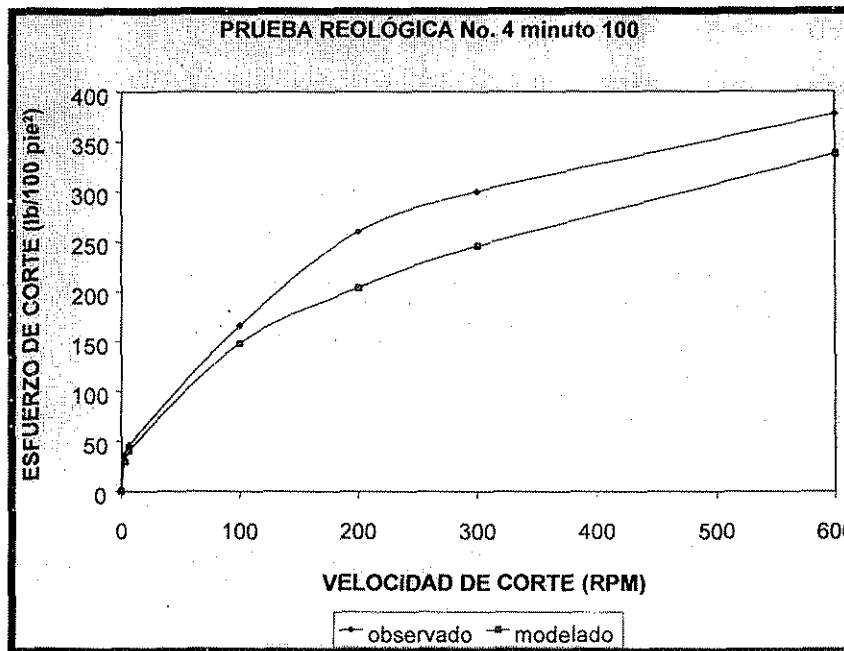


Figura 8.1 Ajuste del modelo reológico para el tercer nivel de presión 18,800 lb/pg<sup>2</sup> y temperatura 136°C para un tiempo de 100 minutos.

De la gráfica anterior tenemos que el modelo predice el comportamiento reológico de la lechada con un 88% en promedio respecto a las velocidades de corte experimentales para un tiempo de 100 minutos.

## 8.5 ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL MODELO REOLÓGICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.

Se realizó una inspección de la ecuación del modelo reológico para determinar la consistencia de las dimensiones de las constantes que propone el modelo. Dado que se basó en el modelo de ley de potencias el cual fue ajustado en función del tiempo recordemos la ecuaciones 8-1, 8-2 y 8-5.

$$\tau = K\gamma^n \dots (8.1)$$

$$\tau = \alpha(t) \gamma^{\beta(t)} \dots (8.2)$$

$$\tau = (\alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3) \gamma^{(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3)} \dots (8.5)$$

donde:

$\tau$  = Esfuerzo de Corte (lb/100pie<sup>2</sup>)

$K$  = Índice de Consistencia del Fluido (lb-seg/100 pie<sup>2</sup>) =  $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3$

$\gamma$  = Velocidad de corte (1/seg)

$n$  = Índice de Comportamiento de Flujo (adimensional) =  $\beta(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3$

Para determinar las unidades y las dimensiones de cada una de las constantes se inspeccionó la ecuación del modelo y de acuerdo a sus dimensiones se ajustó las unidades y se determinó el significado físico que se presenta en la Tabla 8-9, como se puede observar,  $\beta(t)$  es adimensional por lo que se procedió a igualar los términos de la ecuación correspondientes; por un lado el esfuerzo de corte  $\tau$  y por el otro lado de la ecuación  $\alpha(t) \gamma$ , donde se ajustó cada uno de los coeficientes alfa.

Parámetro	Significado Físico	Unidades	Tiempo	Dimensiones	Observaciones
$\tau$	Esfuerzo de Corte	$\left[ \frac{lb}{100 pie^2} \right]$	-	$\left[ \frac{F}{L^2} \right]$	Lecturas de $\tau \times 1.067$
$\gamma$	Velocidad de corte	$\left[ \frac{1}{seg} \right]$	-	$\left[ \frac{1}{T} \right]$	rpmx1.703
<b>K</b>	Indice de Consistencia	$\left[ \frac{lb - seg}{100 pie^2} \right]$	-	$\left[ \frac{F - T^1}{L^2} \right]$	$K \neq K(t)$
Parámetro	Significado Físico	Unidades	Tiempo	$\alpha(t) \gamma$	Dimensiones
$\alpha_0$	Consistencia Inicial	$\left[ \frac{lb - seg}{100 pie^2} \right]$	-	$\left[ \frac{lb - seg}{100 pie^2} \right]$	$\left[ \frac{F - T^{-1}}{L^2} \right]$
$\alpha_1$	Esfuerzo de Inducción	$\left[ \frac{lb}{100 pie^2} \right]$	seg	$\left[ \frac{lb - seg}{100 pie^2} \right]$	$\left[ \frac{F - T^0}{L^2} \right]$
$\alpha_2$	Coefficiente Cinético de Velocidad	$\left[ \frac{lb}{100 pie^2 - seg} \right]$	seg <sup>2</sup>	$\left[ \frac{lb - seg}{100 pie^2} \right]$	$\left[ \frac{F - T^{-1}}{L^2} \right]$
$\alpha_3$	Coefficiente Cinético de Aceleración	$\left[ \frac{lb}{100 pie^2 - seg^2} \right]$	seg <sup>3</sup>	$\left[ \frac{lb - seg}{100 pie^2} \right]$	$\left[ \frac{F - T^{-2}}{L^2} \right]$

Tabla 8-9 Determinación de unidades y dimensiones del modelo reológico en función del tiempo.

La precisión en la predicción del modelo reológico en función del tiempo para las mediciones del esfuerzo de corte respecto a la velocidad de corte es variable, sin embargo es una buena aproximación, considerando que el número de pruebas fue limitado, para poder tener una mayor certeza en la predicción de los esfuerzos de corte con el modelo es necesario contar con un número mayor de pruebas que las que se realizaron para este trabajo, pero para esto se necesitan nuevos viscosímetros especialmente diseñados para medir los cambios y las transformaciones que ocurren en la reología de las lechadas de cemento, debido a que estas se tornan complejas con la presión y la temperatura a pesar de los aditivos usados.

**CONCLUSIONES**

1. Se desarrolló un modelo reológico en función del tiempo, aplicando los cálculos hidráulicos con la lechada de cemento a condiciones de alta presión y temperatura a la profundidad de 6237 m para el pozo Jujo 18 de la Región Sur.
2. El modelo relaciona los esfuerzos de corte con la velocidad de corte mediante dos funciones  $\alpha(t)$  y  $\beta(t)$  cuyos coeficientes tienen un comportamiento no lineal, contienen en forma implícita los efectos de presión, temperatura y fueron obtenidos por un análisis estadístico de regresión con el software *Statística 5.1* y *SPSS 8.0* para Windows.
3. El modelo predice el comportamiento reológico de las lechadas de cemento a alta presión y temperatura con una aproximación del 70 al 88% para un rango de velocidad de corte entre 0 y 300 RPM.
4. La investigación sobre el comportamiento de las lechadas de cemento para alta presión y temperatura aporta en este trabajo, el conocimiento de un incremento de esfuerzos de corte que se presentan dentro del tiempo de bombeable y a pesar de los retardadores utilizados, lo cual debe considerarse en las operaciones de cementación de las tuberías de revestimiento.
5. Se obtuvo una cédula de bombeo para las operaciones de cementación en donde se observa que dentro del tiempo bombeable, se incrementan las caídas de presión por fricción en función del tiempo.

**RECOMENDACIONES**

1. El incremento de la viscosidad observado durante las pruebas reológicas se presenta también en los pozos de alta presión y alta temperatura de la Región Sur, a pesar de los aditivos retardadores, por lo cual se recomienda considerar este incremento, tanto en los cálculos hidráulicos como en los tiempos de operación durante la cementación de las tuberías de revestimiento.
2. Las lechadas de cemento sometidas a altas presiones y temperaturas sufren un proceso de metamorfosis y su comportamiento reológico es inestable a pesar de los aditivos retardadores, para predecir su comportamiento con mayor precisión se recomienda el uso de instrumentos de medición reológica sofisticados.
3. Dadas las transformaciones que ocurren en las lechadas de cemento a altas presiones y temperaturas, se debe continuar investigando estos fenómenos para controlar el comportamiento de las lechadas, debido a que éstos ocurren con frecuencia en los pozos de alta presión y alta temperatura que se perforan, cada vez más, en los campos petroleros de la Región Sur.
4. Para posteriores investigaciones sobre el comportamiento de las lechadas de cemento a altas presiones y temperaturas, se necesitan viscosímetros especialmente diseñados para las características de una lechada, por lo cual se recomienda el uso de viscosímetros de paletas, sin embargo este tipo de viscosímetros se encuentra aún en la etapa de desarrollo.
5. Si se controla este incremento de la viscosidad en las lechadas, es posible disminuir las pérdidas de circulación durante las operaciones de cementación en yacimientos naturalmente fracturados<sup>14</sup>, donde estas no sean severas.
6. Para futuras investigaciones sobre éste tema se recomienda tomar rangos más reducidos de velocidad de corte entre 100 y 300 RPM para determinar el comportamiento reológico.

**NOMENCLATURA**

A	=	Parámetro de ajuste del modelo de Eyring
B	=	Parámetro de ajuste del modelo de Eyring
B <sub>c</sub>	=	Consistencia de la lechada, U <sub>c</sub> API
C <sub>3</sub> A	=	Aluminato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	=	Aluminoferrito tetracálcico
C <sub>2</sub> S	=	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> S	=	Silicato tricálcico
K	=	Índice de consistencia, cp-seg <sup>n-1</sup>
n	=	Índice de comportamiento de flujo, adimensional
P	=	Presión, lb/pg <sup>2</sup> , (psi)
T	=	Temperatura, °C
T	=	Torque de las paletas del consistómetro, gr-cm
t	=	Tiempo en minutos
U <sub>c</sub>	=	Unidad de la consistencia de una lechada de cemento
dV <sub>x</sub> /dy	=	Velocidad de corte, s <sup>-1</sup>
α <sub>n</sub>	=	Parámetros obtenidos por regresión cúbica de las pruebas reológicas
α(t)	=	Función del tiempo del modelo propuesto asociada a la consistencia
β <sub>n</sub>	=	Parámetros obtenidos por regresión cúbica de las pruebas reológicas
β(t)	=	Función del tiempo del modelo propuesto asociada al comportamiento de flujo de la lechada de cemento
γ	=	Velocidad de corte, s <sup>-1</sup>
μ	=	Viscosidad absoluta, cp
μ <sub>a</sub>	=	Viscosidad aparente, cp
μ <sub>p</sub>	=	Viscosidad plástica, cp
τ	=	Esfuerzo de corte, lb/100 pie <sup>2</sup>
τ <sub>o</sub>	=	Punto de cadencia, lb/100 pie <sup>2</sup>
τ <sub>y</sub>	=	Punto de cadencia, lb/100 pie <sup>2</sup>

**REFERENCIAS**

1. J. Antonio Ceballos, "Las Reservas de Hidrocarburos de México", PEMEX-EXPLORACION Y PRODUCCIÓN, México, 1999, 345 pp.
2. Carlos Rasso, "Un siglo de la Perforación en México", Tomo VII Ingeniería de Cementaciones Unidad de Perforación y Mantenimiento de Pozos, PEMEX, México, 2000.
3. Dewight K. Smith, "Cementing", Henry L. Doherty series Halliburton Services, Society of Petroleum Engineers of AIME, USA, 1976. 183 pp.
4. Exploration and Production Department, "Specification for Cements and Materials for Well Cementing", American Petroleum Institute Specification 10 Twenty Second Edition, Dallas Texas USA, 1995, 72 pp.
5. Erik B. Nelson, "Well Cementing", Dowell Schlumberger Services, FRANCE, 1990, 303 pp.
6. Adam T. Burgoyne, Martin Chenevert, K.K. Millheim, "Applied Drilling Engineering", Society of Petroleum Engineers, Wyoming USA, 1984, 486 pp.
7. Juan Gilberto León Loya, "Fundamentos de Reología No-Newtoniana y Viscosimetría Capilar y Rotacional" Instituto Mexicano del Petróleo, México, 1992, 175 pp.
8. R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, "Fenómenos de Transporte", Editorial Reverté, México 1998, 564 pp.



## REFERENCIAS

---

9. D. Marmissolle- Daguerre, "Evaluación de Formaciones en México", Petróleos Mexicanos y Schlumberger Offshore Services, París Francia, 1984, 325 pp.
10. NL BAROID, "The Model Fann 70 Viscosmeter Handbook", NL Industries, Houston Texas, 1987, 69 pp.
11. Reyes Castañeda Pedro, "Diseño de Experimentos Aplicados", Editorial Trillas, México, 1992, 348 pp.
12. James L. Rike Chairman, "Well Completions Volume I", Society of Petroleum Engineers, Dallas Texas, 1980, 297 pp.
13. Thomas Mezger, "A little course in rheology", Editorial PHYSICA Meßtechnik GmbH, Stuttgart Alemania, 1991, 88 pp.
14. Roberto Aguilera, "Naturally Fractured Reservoirs", Penwell Publishing, Tulsa Oklahoma USA, 1995, 521 pp.
15. Douglas C. Montgomery, "Diseño y Análisis de Experimentos", Limusa Wiley, Arizona USA, Mexico 2002, 686 pp.

## PROBLEMA DE APLICACIÓN DEL MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO AL POZO JUJO 18

Se seleccionó el Pozo Jujo 18 de la Región Sur, para realizar los cálculos hidráulicos en la cementación de una tubería de revestimiento corta o liner a diferentes tiempos usando los datos obtenidos del modelo basado en las pruebas reológicas realizadas en este trabajo, los datos fueron proporcionados por la Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos de la Región Sur.

### Objetivo:

Observar el impacto del comportamiento en las caídas de presión del sistema y la presión de bombeo requerida a diferentes tiempos durante la operación de Cementación de la T.R. corta o Liner de 5" a 6237 m en las calizas del Cretácico Superior del Pozo Jujo 18, usando el modelo reológico en función del tiempo.

### Datos:

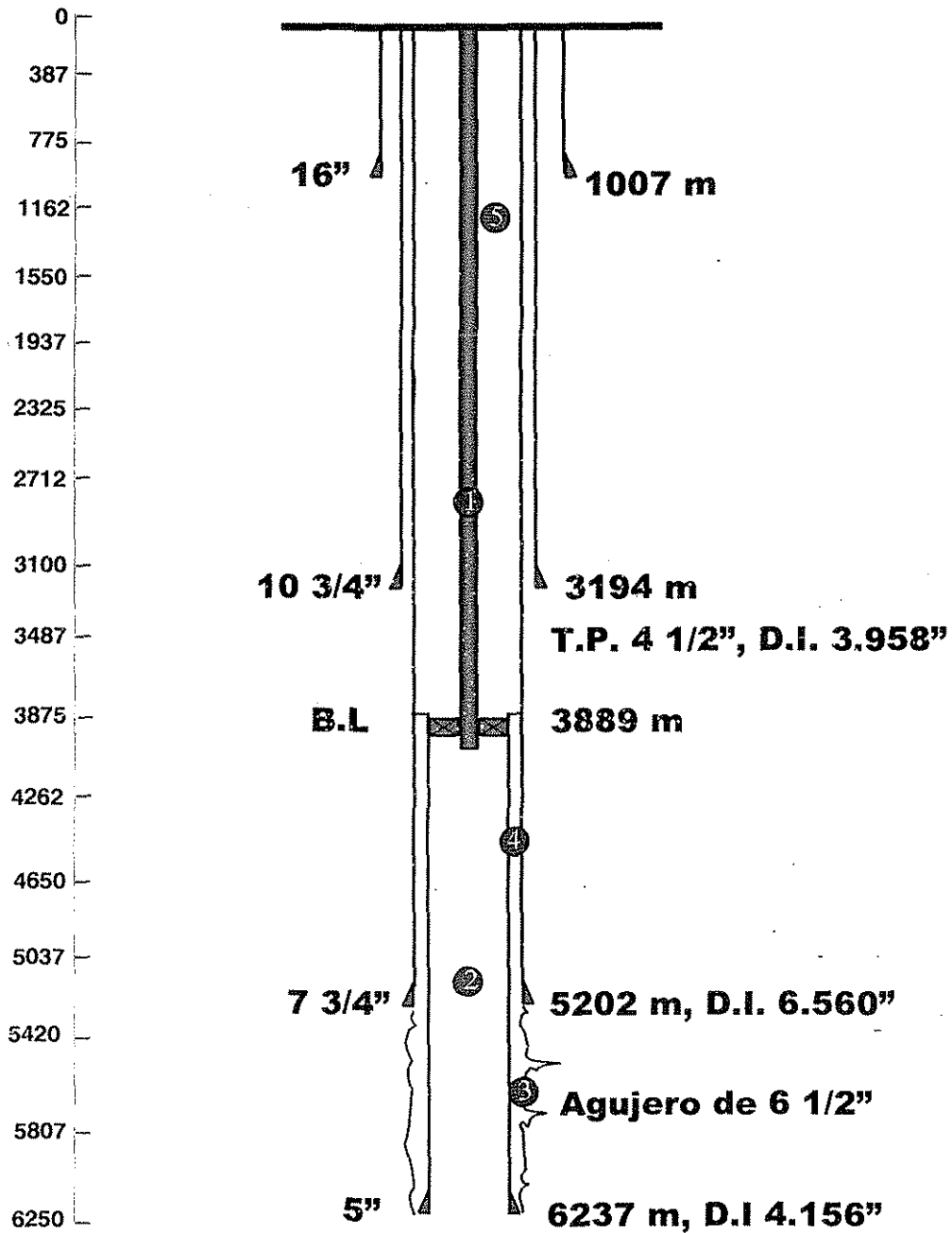
#### Pozo: Jujo 18

- ◆ T.R. de 16" cementada a 1007 m.
- ◆ T.R. de 10 ¾" cementada a 3194 m.
- ◆ T.R. de 7 ¾" cementada a 5202 m.
- ◆ T.R. corta o Liner de 5" a 6237 m.
- ◆ Diámetro de la barrena 6 ½".
- ◆ Diámetro interno de la T.R. de 5" = 4.156"
- ◆ Diámetro interno de la T.R. de 7 ¾" = 6.560"
- ◆ Temperatura de fondo estática de 154°C.
- ◆ Temperatura dinámica equivalente 136°C.
- ◆ Tubería de Perforación de 4 ½" a 3889 m.
- ◆ En la Figura A-1 se muestra el estado mecánico del pozo Jujo 18 donde se consideran 5 secciones geométricas para los cálculos hidráulicos.



- ◆ Gasto = 6 bls/min (252 gal/min).
- ◆ Densidad de la lechada de cemento =  $1.35 \text{ g/cm}^3$ .
- ◆ Tiempo = 100 minutos
- ◆  $L_{600} = 122 \text{ (cp) lb/100 pie}^2$ .
- ◆  $L_{300} = 58 \text{ (cp)}$
- ◆ Densidad del lodo para el desplazamiento de la lechada  $1.25 \text{ g/cm}^3$ .

DATOS PROPORCIONADOS POR LA GERENCIA DE PERFORACIÓN  
Y MANTENIMIENTO DE POZOS Y LA SUBGERENCIA DE TERMINACIÓN  
Y REPARACIÓN DE POZOS DE LA REGIÓN SUR



Temp. 154°C

Figura A-1 Estado Mecánico del pozo JUJO 18

1) Cálculo de la viscosidad plástica.

$$\mu_p = L_{600} - L_{300}$$

$$\mu_p = 122 - 58 = 64 \text{ (cp)}$$

2) Cálculo de la velocidad promedio de flujo en (pie/min) para el interior de la T.R. corta o Liner de 5" a 6237 m (sección 2).

$$V = 24.51 * \frac{Q}{D_i^2} = \frac{24.51 * 252 \frac{\text{gal}}{\text{min}}}{4.156^2} = 247 \frac{\text{pies}}{\text{min}}$$

3) Cálculo del índice de comportamiento de flujo (adimensional).

$$n = 3.32 * \log \frac{L_{600}}{L_{300}} = 3.32 * \log \frac{122}{58} = 1.07213$$

4) Cálculo del índice de consistencia en (lb/100 pie<sup>2</sup>)

$$K = \frac{L_{600}}{1022^n} = \frac{122}{1022^{1.07213}} = 0.07241 \left( \frac{\text{lb}}{100 * \text{pie}^2} \right)$$

5) Cálculo del Número de Reynolds para el flujo de la lechada de cemento por el interior de la tubería de revestimiento de 5".

$$R_e = \left[ \left( \frac{n}{3 * n + 1} \right) \left( \frac{2.5 * D_i}{V} \right) \right]^n \left( \frac{\rho * V^2}{2.326 * K} \right) = 4,598.53$$

6) Cálculo del número de Reynolds crítico (Laminar-Transición).

$$R_{e\text{crítico}} = 3470 - 1370 * n = 3470 - 1370 * 1.07213 = 2001.1768$$

7) Cálculo del número de Reynolds crítico (Transición-Turbulento)

$$R_{\text{crítico (Trans-Turb)}} = 4270 - 1370 * n = 4270 - 1370 * 1.07213 = 2801.1768$$

8) Cálculo de la Caída de presión para flujo turbulento por el interior de la Tubería de Revestimiento de 5".

Como  $R_e > R_{\text{crítico (Trans.-Turb.)}}$  es decir  $4,598.53 > 2801.17$  el flujo es turbulento.

$$\Delta P = \frac{fLV^2\rho}{3396 * D_i}$$

donde f es el factor de fricción y esta dado por:

$$f_{\text{Turb.}} = \frac{a}{R_e^b}$$

donde a y b son dos variables en función del índice de comportamiento de flujo para el interior de la tubería y estan dadas por las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{\log(n) + 3.93}{50} = \frac{\log(1.07213) + 3.93}{50} = 0.079205$$

$$b = \frac{1.75 - \log(n)}{7} = \frac{1.75 - \log(1.07213)}{7} = 0.245679$$

Por lo tanto el facto de fricción esta dado por:

$$f_{\text{Turb.}} = \frac{a}{R_e^b} = \frac{0.079205}{4598.53^{0.245679}} = 0.009975$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La Caída de presión para flujo turbulento por el interior de la Tubería de Revestimiento de 5" queda como:

$$\Delta P = \frac{fLV^2\rho}{3396D_i} = \frac{0.009975 * (7701.44\text{pie}) * (247 \frac{\text{pie}}{\text{min}}) \left(1.35 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)}{3396 * (4.156\text{pg})} = 372.96 \left(\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}\right)$$

9) Cálculo del Número de Reynolds para el flujo de la lechada de cemento por el espacio anular entre el agujero de 6 1/2" y el exterior de la tubería de revestimiento de 5".

$$R_e = \left[ \frac{1.25 * (D_a - D_e)}{V} \left( \frac{n}{2n + 1} \right) \right]^n \left( \frac{\rho * V^2}{1.55 * K} \right)$$

$$R_e = \left[ \frac{1.25 * (6.5 - 5)}{358 \frac{\text{pie}}{\text{min}}} \left( \frac{1.07213}{2 * 1.07213 + 1} \right) \right]^{1.07213} \left( \frac{1.3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * (358 \frac{\text{pie}}{\text{min}})}{1.55 * 0.07241 \frac{\text{lb}}{100\text{pie}^2}} \right) = 1744.60$$

Como  $R_e < R_{e \text{ crítico}}$  (Laminar.-Transición) es decir  $1,744.6083 < 2001.17$  el flujo es laminar.

10) Cálculo de la Caída de presión para flujo laminar por el espacio anular entre el agujero de 6 ½" y el interior de la Tubería de Revestimiento de 5" (Sección 2).

$$\Delta P = \left[ \left( \frac{2n+1}{3n} \right) \left( \frac{2.4 * V}{D_a - D_e} \right) \right]^n \left( \frac{KL}{91.46(D_a - D_e)} \right)$$

$$\Delta P = \left[ \left( \frac{2 * 1.07213 + 1}{3 * 1.07213} \right) \left( \frac{2.4 * 358}{6.5 - 5} \right) \right]^n \left( \frac{0.07241 \frac{lb}{100pie^2} * 3394.80pie}{91.46(6.5 - 5)} \right) = 1584.42 \frac{lb}{pg^2}$$

La siguiente fórmula expresa las caídas de presión en todo el sistema durante la cementación y la presión superficial o de bombeo respectivamente.

$$\Delta P_p = \Delta P_{T.P.A \ 1/2"} + \Delta P_{T.R.5"} + \Delta P_{Ag.6 \ 1/2"-T.R.5"} + \Delta P_{T.R.7 \ 3/4"-T.R.5"} + \Delta P_{T.R.7 \ 3/4"-T.P.A \ 1/2"}$$

$$P_s = \Delta P_p + P_h$$

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para todas las secciones marcadas en el esquema del pozo Figura A-1 y un resumen con las caídas de presión en todo el sistema, los cálculos de la potencia hidráulica de la bomba para diferentes tiempos de operación durante la cementación ofreciendo con esto una cédula de bombeo para las condiciones dadas en el problema de cálculo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**ANEXO "A" PROBLEMA DE APLICACIÓN POZO JUJO 18 REGIÓN SUR**

SECCIONES 0,1 Y 2 POR EL INTERIOR DE LA TUBERÍA								
MODELO DE LEY DE POTENCIAS SIN CONSIDERAR EL TIEMPO DE BOMBEO TRANSCURRIDO Y UNA TEMPERATURA DE 136°C DINÁMICA								
DENSIDAD	DENSIDAD	GASTO	GASTO	L600	VISC.PLAST.	DIAM. EXT.	DIAM. INT.	VEL.INT.TUB.
(G/CM3)	(LB./GAL)	(BLD/MIN)	(GAL/MIN)	L300	(CP)	PG	PG	(PIE/MIN)
1.35	11.25	6	252	99	39	3.5	2.764	809
1.35	11.25	6	252	60	39	6.5	3.958	394
1.35	11.25	6	252		39	6.5	5	247

VEL. ANULAR	n	K	Re INT. TUB.	Re1	Re2	Re3	Re4	Re-cr1(Lam-Trans)
(PIE/MIN)	ADIM	(LB/100PIE2)	ADIM	2.5*dn/v	Dens.*V <sup>2</sup> /2	2.326*k	Re2/Re3	ADIM
NO HAY	0.72205	0.66477	6,304.2738	0.00854532	882740.8364	1.546253987	570889.9338	2480.796028
NO HAY	0.72205	0.66477	3,263.3757	0.025092364	209933.7257	1.546253987	135769.2381	2480.796028
NO HAY	0.72205	0.66477	2,125.8906	0.050585287	82433.80667	1.546253987	53311.94445	2480.796028

Re-cr1(Trans-Turb)	TIPO DE FLUJO	constante a	constante b	Fac1.Fric.Turb.	Long. Secc.	Long. Secc.	Caída de Presión	No. De Sección
ADIM.				f <sub>turb.</sub>	(m)	(pies)	Int.Tub.fluj.turb.	
3280.796028	TURBULENTO	0.075771	0.270205	0.007126	133	436.90	292.77	Sección 0
3280.796028	LAMINAR	0.075771	0.270205	0.008513	3889	12755.92	1696.07	Sección 1
3280.796028	LAMINAR	0.075771	0.270205	0.009558	2348	7701.44	357.38	Sección 2

SECCIONES 3,4 Y 5 POR EL EXTERIOR DE LA TUBERÍA								
MODELO DE LEY DE POTENCIAS SIN CONSIDERAR EL TIEMPO DE BOMBEO TRANSCURRIDO Y UNA TEMPERATURA DE 136°C DINÁMICA								
DENSIDAD	DENSIDAD	GASTO	GASTO	L600	VISC.PLAST.	DIAM. EXT.	DIAM. INT.	VEL. ANULAR
(G/CM3)	(LB./GAL)	(BLD/MIN)	(GAL/MIN)	L300	(CP)	PG	PG	(PIE/MIN)
1.35	11.25	6	252	99	39	6.5	5	358
1.35	11.25	6	252	60	39	6.56	4.156	240
1.35	11.25	6	252		39	6.56	4.5	271

n	K	Re ESP. ANUL.	Re1	Re2	Re3	Re4	Re-cr1(Lam-Trans)	Re-cr1(Trans-Turb)
ADIM	(LB/100PIE2)	ADIM	1.25(Da-De)	n/2n1	(R1/R2)/n	Re2/Re3	ADIM	ADIM
0.72205	0.66477	1,570.4663	0.0052	0.2954	0.0093	163,036.78	2480.796028	3280.796028
0.72205	0.66477	1,322.3412	0.0125	0.2954	0.0176	75,343.92	2480.796028	3280.796028
0.72205	0.66477	1,383.8533	0.0095	0.2954	0.0144	96,324.74	2480.796028	3280.796028

TIPO DE FLUJO	Long. Secc.	Long. Secc.	Caída de Presión (pal)	P1	P2	P3	P4	No. De Sección
	(m)	(pies)	esp.anul.fluj.laminar.	2n1-1/3n	2.4V/Da-De	(P1*P2)/n	KL/81.45(Da-De)	
LAMINAR	1035	3394.80	1760.11	1.128317327	573.00	107.00	16.4499	Sección 3
LAMINAR	1313	4306.64	741.91	1.128317327	239.41	56.98	13.0210	Sección 4
LAMINAR	3889	12755.92	3132.80	1.128317327	315.90	63.61	45.0075	Sección 5

Tabla A-1 Caídas de presión con el modelo de Ley de Potencias sin considerar el tiempo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ANEXO "A" PROBLEMA DE APLICACIÓN POZO JUJO 18 REGIÓN SUR**

SECCIONES 0.1 Y 2 POR EL INTERIOR DE LA TUBERÍA								
MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 15 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE 135°C DINÁMICA								
DENSIDAD	DENSIDAD	GASTO	GASTO	$L_{900}$	VISC. PLAST.	DIAM. EXT.	DIAM. INT.	VEL. INT. TUB.
(G/CM <sup>3</sup> )	(LB/GAL)	(BLS/MIN)	(GAL/MIN)	$L_{300}$	(CP)	PG	PG	(PIE/MIN)
1.35	11.25	6	252	122	64	3.5	2.764	809
1.35	11.25	6	252	58	64	6.5	3.958	394
1.35	11.25	6	252		64	NO HAY	4.156	247

n	K	Re INT. TUB.	Re1	Re2	Re3	Re4	Re-crít(Lam-Trans)	Re-crít(Trans-Turb)
ADIM.	(LB/100PIE <sup>2</sup> )	ADIM.	2.5*di/v	Dam <sup>n</sup> *V <sup>1/2</sup>	2.326* $\eta$	Re2/Re3	ADIM.	ADIM.
1.07213	0.07241	7,317.1719	0.00854532	882740.8364	0.168436349	5240797.731	2001.176832	2801.176832
1.07213	0.07241	5,522.6893	0.025092364	209933.7257	0.168436349	1246368.297	2001.176832	2801.176832
1.07213	0.07241	4,598.5388	0.050585287	82433.80667	0.168436349	489406.2777	2001.176832	2801.176832

TIPO DE FLUJO	constante a	constante b	Fact.Fric. Turb.	Long. Secc.	Long. Secc.	Caída de Presión	No. De Sección
			turb.	(m)	(pies)	Intub.fluj.turb.	
TURBULENTO	0.079205	0.245679	0.008699	133	436.90	363.65	Sección 0
TURBULENTO	0.079205	0.245679	0.009536	3889	12755.92	1899.92	Sección 1
TURBULENTO	0.079205	0.245679	0.009975	2348	7701.34	372.96	Sección 2

SECCIONES 3,4 Y 5 POR EL EXTERIOR DE LA TUBERÍA								
MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 15 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE 135°C DINÁMICA								
DENSIDAD	DENSIDAD	GASTO	GASTO	$L_{900}$	VISC. PLAST.	DIAM. EXT.	DIAM. INT.	VEL. ANUL. (AN)
(G/CM <sup>3</sup> )	(LB/GAL)	(BLS/MIN)	(GAL/MIN)	$L_{300}$	(CP)	PG	PG	(PIE/MIN)
1.35	11.25	6	252	122	64	6.5	5	358
1.35	11.25	6	252	58	64	6.56	5	240
1.35	11.25	6	252		64	6.56	4.5	271

n	K	Re ESP. ANUL.	Re1	Re2	Re3	Re4	Re-crít(Lam-Trans)	Re-crít(Trans-Turb)
ADIM.	(LB/100PIE <sup>2</sup> )	ADIM.	1.25(Da-De)	n/2n+1	(R1/R2) <sup>n</sup>	Re2/Re3	ADIM.	ADIM.
1.07213	0.07241	1,744.6083	0.0052	0.3410	0.0011	1,542,585.93	2001.176832	2801.176832
1.07213	0.07241	1,993.8996	0.0125	0.3410	0.0029	691,680.91	2001.176832	2801.176832
1.07213	0.07241	1,893.6298	0.0095	0.3410	0.0021	884,265.89	2001.176832	2801.176832

TIPO DE FLUJO	Long. Secc.	Long. Secc.	Caída de Presión (psi)	P1	P2	P3	P4	No. De Sección
	(m)	(pies)	esp.anul.fluj.laminar.	2n+1/2n	2.4V(Da-De)	(P1/P2) <sup>n</sup>	KL/01.46(Da-De)	
LAMINAR	1035	3394.80	1584.42	0.977573164	573.00	884.20	1.7919	Sección 3
LAMINAR	1313	4306.64	492.03	0.977573164	239.41	346.89	1.4184	Sección 4
LAMINAR	3889	12755.92	2289.43	0.977573164	315.90	466.97	4.9027	Sección 5

Tabla A-2 Caídas de presión con el modelo de Ley de Potencias en función del tiempo minuto 15

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

**ANEXO "A" PROBLEMA DE APLICACIÓN POZO JUJO 18 REGIÓN SUR**

SECCIONES 0,1 Y 2 POR EL INTERIOR DE LA TUBERÍA								
MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 35 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE 136°C DINÁMICA								
DENSIDAD	DENSIDAD	GASTO	GASTO	$L_{300}$	VISC. PLAST.	DIAM. EXT.	DIAM. INT.	VEL. INT. TUB.
(G/CM <sup>3</sup> )	(LB/GAL)	(BLS/MIN)	(GAL/MIN)	$L_{300}$	(CP)	PG	PG	(PIE/MIN)
1.35	11.25	6	252	130	76	3.5	2.784	809
1.35	11.25	6	252	54	76	6.5	3.958	394
1.35	11.25	6	252		76	NO HAY	4.156	358

n	K	Re INT. TUB.	Re1	Re2	Re3	Re4	Re-crit(Lam-Trans)	Re-crit(Trans-Turb)
ADIM	(LB/100PIE <sup>2</sup> )	ADIM	$2.5 \cdot \rho \cdot V \cdot D$	$Dens \cdot V \cdot D$	$2.326 \cdot K$	$Re2/Re3$	ADIM	ADIM
1.26674	0.02003	8,406.3841	0.00854532	882740.8364	0.046595851	18944623.04	1734.559834	2534.559834
1.26674	0.02003	7,824.5282	0.025092364	209933.7257	0.046595851	4505416.688	1734.559834	2534.559834
1.26674	0.02003	7,467.6346	0.050585287	82433.80667	0.046595851	1769123.313	1734.559834	2534.559834

TIPO DE FLUJO	constante a	constante b	Fact. Fric. Turb.	Long. Secc.	Long. Secc.	Caída de Presión	No. De Sección
			turb.	(m)	(pies)	Int. Tub. flu. turb.	
TURBULENTO	0.080654	0.235330	0.009617	133	436.90	395.14	Sección 0
TURBULENTO	0.080654	0.235330	0.009781	3889	12755.92	1948.62	Sección 1
TURBULENTO	0.080654	0.235330	0.009889	2348	7701.44	388.73	Sección 2

SECCIONES 3,4 Y 5 POR EL EXTERIOR DE LA TUBERÍA								
MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 35 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE 136°C DINÁMICA								
DENSIDAD	DENSIDAD	GASTO	GASTO	$L_{300}$	VISC. PLAST.	DIAM. EXT.	DIAM. INT.	VEL. ANULAR
(G/CM <sup>3</sup> )	(LB/GAL)	(BLS/MIN)	(GAL/MIN)	$L_{300}$	(CP)	PG	PG	(PIE/MIN)
1.35	11.25	6	252	130	76	6.5	6	358
1.35	11.25	6	252	54	76	6.56	5	240
1.35	11.25	6	252		76	6.56	4.5	271

n	K	Re ESP. ANUL.	Re1	Re2	Re3	Re4	Re-crit(Lam-Trans)	Re-crit(Trans-Turb)
ADIM	(LB/100PIE <sup>2</sup> )	ADIM	$1.25(Da-De)$	$n/2n+1$	$(R1/R2)^n$	$Re2/Re3$	ADIM	ADIM
1.26674	0.02003	1,961.0793	0.0052	0.3585	0.0004	5,576,194.79	1734.559834	2534.559834
1.26674	0.02003	2,656.2086	0.0125	0.3585	0.0011	2,500,240.57	1734.559834	2534.559834
1.26674	0.02003	2,390.1243	0.0095	0.3585	0.0007	3,196,475.94	1734.559834	2534.559834

TIPO DE FLUJO	Long. Secc.	Long. Secc.	Caída de Presión (psf)	P1	P2	P3	P4	No. De Sección
	(m)	(pies)	esp. anul. flu. laminar.	$2n/1/3n$	$2.4V/Da-De$	$(P1/P2)^n$	$KL/D1.46(Da-De)$	
LAMINAR	1035	3394.80	1409.52	0.929808361	573.00	2843.43	0.4957	Sección 3
TURBULENTO	1313	4306.64	369.34	0.929808361	239.41	941.28	0.3924	Sección 4
LAMINAR	3889	12755.92	1813.85	0.929808361	315.90	1337.37	1.3563	Sección 5

**Tabla A-3 Caídas de presión con el modelo de Ley de Potencias en función del tiempo minuto 35**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ANEXO "A" PROBLEMA DE APLICACIÓN POZO JUJO 18 REGIÓN SUR**

SECCIONES 0,1 Y 2 POR EL INTERIOR DE LA TUBERÍA								
MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 70 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE 136°C DINÁMICA								
DENSIDAD	DENSIDAD	GASTO	GASTO	$L_{100}$	VISC. PLAST.	DIAM. EXT.	DIAM. INT.	VEL. INT. TUB.
(G/CM <sup>3</sup> )	(LB/GAL)	(BLS/MIN)	(GAL/MIN)	$L_{100}$	(CP)	PG	PG	(PIE/MIN)
1.35	11.25	6	252	140	40	3.5	2.764	809
1.35	11.25	6	252	100	40	6.5	3.956	394
1.35	11.25	6	252		40	NO HAY	4.156	247

n	K	Re INT. TUB.	Re1	Re2	Re3	Re4	Re-crit(Lam-Trans)	Re-crit(Trans-Turb)
ADIM	(LB/100PIE <sup>2</sup> )	ADIM	2.8*Di/v	Dens.*V <sup>2</sup>	2.326*V	Re2/Re3	ADIM	ADIM
0.48515	4.8541	3532.13	0.00854532	882740.8364	11.29061127	78183.61781	2805.351243	3605.351243
0.48515	4.8541	1416.59	0.025092364	209933.7257	11.29061127	18593.65456	2805.351243	3605.351243
0.48515	4.8541	781.60	0.050585287	82433.80667	11.29061127	7301.093333	2805.351243	3605.351243

TIPO DE FLUJO	constante a	constante b	Fact. Fric. Turb.	Long. Secc.	Long. Secc.	Caída de Presión	No. De Sección
			f <sub>turb</sub>	(m)	(pies)	Int. tur. fluj. turb.	
LAMINAR	0.072317	0.294875	0	133.20	436.90	267.13	Sección 0
LAMINAR	0.072317	0.294875	0	3889.00	12755.92	1635.78	Sección 1
LAMINAR	0.072317	0.294875	0	2348.00	7701.44	379.24	Sección 2

SECCIONES 3,4 Y 5 POR EL EXTERIOR DE LA TUBERÍA								
MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 70 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE 136°C DINÁMICA								
DENSIDAD	DENSIDAD	GASTO	GASTO	$L_{100}$	VISC. PLAST.	DIAM. EXT.	DIAM. INT.	VEL. ANULAR
(G/CM <sup>3</sup> )	(LB/GAL)	(BLS/MIN)	(GAL/MIN)	$L_{100}$	(CP)	PG	PG	(PIE/MIN)
1.35	11.25	6	252	140	40	6.5	5	358
1.35	11.25	6	252	100	40	6.56	4	240
1.35	11.25	6	252		40	6.56	4.5	271

n	K	Re SSP ANUL.	Re1	Re2	Re3	Re4	Re-crit(Lam-Trans)	Re-crit(Trans-Turb)
ADIM	(LB/100PIE <sup>2</sup> )	ADIM	1.25(Da-De)	n/2m1	(R1/R2)*n	Re2/Re3	ADIM	ADIM
0.48515	4.85409	912.1094	0.0052	0.2462	0.0396	23.012.71	2805.351243	3605.351243
0.48515	4.85409	624.5556	0.0125	0.2462	0.0605	10,318.38	2805.351243	3605.351243
0.48515	4.85409	697.9807	0.0095	0.2462	0.0529	13,191.71	2805.351243	3605.351243

TIPO DE FLUJO	Long. Secc.	Long. Secc.	Caída de Presión (psi)	P1	P2	P2	P4	No. De Sección
	(m)	(pies)	esp. anul. fluj. laminar.	2m-1/3n	2.4V/Da-De	(P1*P2)*n	KL/31.42(Da-De)	
LAMINAR	1035	3394.80	3050.54	1.353746363	573.00	25.23	120.1156	Sección 3
LAMINAR	1313	4306.64	1570.80	1.353746363	239.41	16.52	95.0781	Sección 4
LAMINAR	3889	12755.92	6211.25	1.353746363	315.80	18.90	328.6405	Sección 5

Tabla A-4 Caídas de presión con el modelo de Ley de Potencias en función del tiempo minuto 70

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**ANEXO "A" PROBLEMA DE APLICACIÓN POZO JUJO 18 REGIÓN SUR**

SECCIONES 0,1 Y 2 POR EL INTERIOR DE LA TUBERÍA								
MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 100 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE 136°C DINÁMICA								
DENSIDAD	DENSIDAD	GASTO	GASTO	$L_{100}$	VISC. PLAST.	DIAM. EXT.	DIAM. INT.	VEL. INT. TUB.
(G/CM <sup>3</sup> )	(LB/GAL)	(BLS/MIN)	(GAL/MIN)	$L_{100}$	(CP)	PG	PG	(PIE/MIN)
1.35	11.25	6	252	378	78	3.5	2.764	809
1.35	11.25	6	252	300	78	6.5	3.958	394
1.35	11.25	6	252		78	NO HAY	4.156	247

n	K	Re INT. TUB.	Re1	Re2	Re3	Re4	Re-crít(Lam-Trans)	Re-crít(Trans-Turb)
ADIM	(LB/100PIE <sup>2</sup> )	ADIM	2.5(Da/Ds)	Dens. V <sup>2</sup> /Z	2.322* $\mu$	Re2/Re3	ADIM	ADIM
0.33323	37.55362	1,137.7194	0.00854532	882740.8364	87.34972798	10105.82239	3013.474613	3813.474613
0.33323	37.55362	387.4125	0.025092364	209933.7257	87.34972798	2403.370114	3013.474613	3813.474613
0.33323	37.55362	192.1585	0.050585287	62433.80667	87.34972798	943.7213896	3013.474613	3813.474613

TIPO DE FLUJO	constante a	constante b	Fact. Fric. Turb.	Long. Secc. (m)	Long. Secc. (pies)	Caída de Presión int. tub. fluj. turb.	No. De Sección
LAMINAR	0.069055	0.318179	0.007359	133	436.90	302.37	Sección 0
LAMINAR	0.069055	0.318179	0.010388	3889	12755.92	2068.58	Sección 1
LAMINAR	0.069055	0.318179	0.012959	2346	7701.44	484.53	Sección 2

SECCIONES 3,4 Y 5 POR EL EXTERIOR DE LA TUBERÍA								
MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 100 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE 136°C DINÁMICA								
DENSIDAD	DENSIDAD	GASTO	GASTO	$L_{100}$	VISC. PLAST.	DIAM. EXT.	DIAM. INT.	VEL. ANULAR
(G/CM <sup>3</sup> )	(LB/GAL)	(BLS/MIN)	(GAL/MIN)	$L_{100}$	(CP)	PG	PG	(PIE/MIN)
1.35	11.25	6	252	378	78	6.5	5	358
1.35	11.25	6	252	300	78	6.56	5	240
1.35	11.25	6	252		78	6.56	4.5	271

n	K	Re ESP. ANUL.	Re1	Re2	Re3	Re4	Re-crít(Lam-Trans)	Re-crít(Trans-Turb)
ADIM	(LB/100PIE <sup>2</sup> )	ADIM	(25(Da/Ds))	(1/25)*1	(R1/R2)*n	Re2/Re3	ADIM	ADIM
0.33323	37.55362	302.2518	0.0052	0.2000	0.1016	2,974.57	3013.474613	3813.474613
0.33323	37.55362	181.2651	0.0125	0.2000	0.1359	1,333.73	3013.474613	3813.474613
0.33323	37.55362	211.2899	0.0095	0.2000	0.1239	1,705.13	3013.474613	3813.474613

TIPO DE FLUJO	Long. Secc. (m)	Long. Secc. (pies)	Caída de Presión (psi) esp. anul. fluj. laminar.	P1 (2n+1/3n)	P2 (24V/Da-Ds)	P3 (P1/P2)*n	P4 KL/91.46(Da-Ds)	No. De Sección
LAMINAR	1035	3394.80	9145.31	1.566976133	573.00	9.84	929.2736	Sección 3
LAMINAR	1313	4306.64	5412.25	1.666976133	239.41	7.36	735.5713	Sección 4
LAMINAR	3889	12755.92	20518.40	1.666976133	315.90	8.07	2542.5249	Sección 5

**Tabla A-5 Caídas de presión con el modelo de Ley de Potencias en función del tiempo minuto**

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

**ANEXO "A" PROBLEMA DE APLICACIÓN POZO JUJO 18 REGIÓN SUR**

<b>MODELO DE LEY DE POTENCIAS SIN CONSIDERAR EL TIEMPO DE BOMBEO TRANSCURRIDO Y UNA TEMPERATURA DE °C DINÁMICA</b>						
Caida de Presión (psi)	No. De Sección	Long. Secc. (m)	Tipo de Sección	GASTO (GAL/MIN)	Caida de Presión parásita del sist. (psi)	Potencia de la bomba Pp <sup>o</sup> /1714 (H.P.)
292.77	Sección 0	133	conex.sup.	252	7991.04	1173.63
1696.07	Sección 1	3889	Interior T.P.			
357.38	Sección 2	2348	Interior liner			
1760.11	Sección 3	1035	Agujero-liner			
741.91	Sección 4	1313	T.R.-liner			
3132.80	Sección 5	3889	T.R.-T.P.			
7991.04						

<b>MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 15 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE °C DINÁMICA</b>						
Caida de Presión (psi)	No. De Sección	Long. Secc. (m)	Tipo de Sección	GASTO (GAL/MIN)	Caida de Presión parásita del sist. (psi)	Potencia de la bomba Pp <sup>o</sup> /1714 (H.P.)
365.65	Sección 0	133	conex.sup.	252	7004.41	1030.01
1899.92	Sección 1	3889	Interior T.P.			
372.96	Sección 2	2348	Interior liner			
1584.42	Sección 3	1035	Agujero-liner			
492.03	Sección 4	1313	T.R.-liner			
2289.43	Sección 5	3889	T.R.-T.P.			
7004.41						

<b>MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 35 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE °C DINÁMICA</b>						
Caida de Presión (psi)	No. De Sección	Long. Secc. (m)	Tipo de Sección	GASTO (GAL/MIN)	Caida de Presión parásita del sist. (psi)	Potencia de la bomba Pp <sup>o</sup> /1714 (H.P.)
395.14	Sección 0	133	conex.sup.	252	6306.20	927.34
1948.62	Sección 1	3889	Interior T.P.			
369.73	Sección 2	2348	Interior liner			
1409.52	Sección 3	1035	Agujero-liner			
369.34	Sección 4	1313	T.R.-liner			
1813.85	Sección 5	3889	T.R.-T.P.			
6306.20						

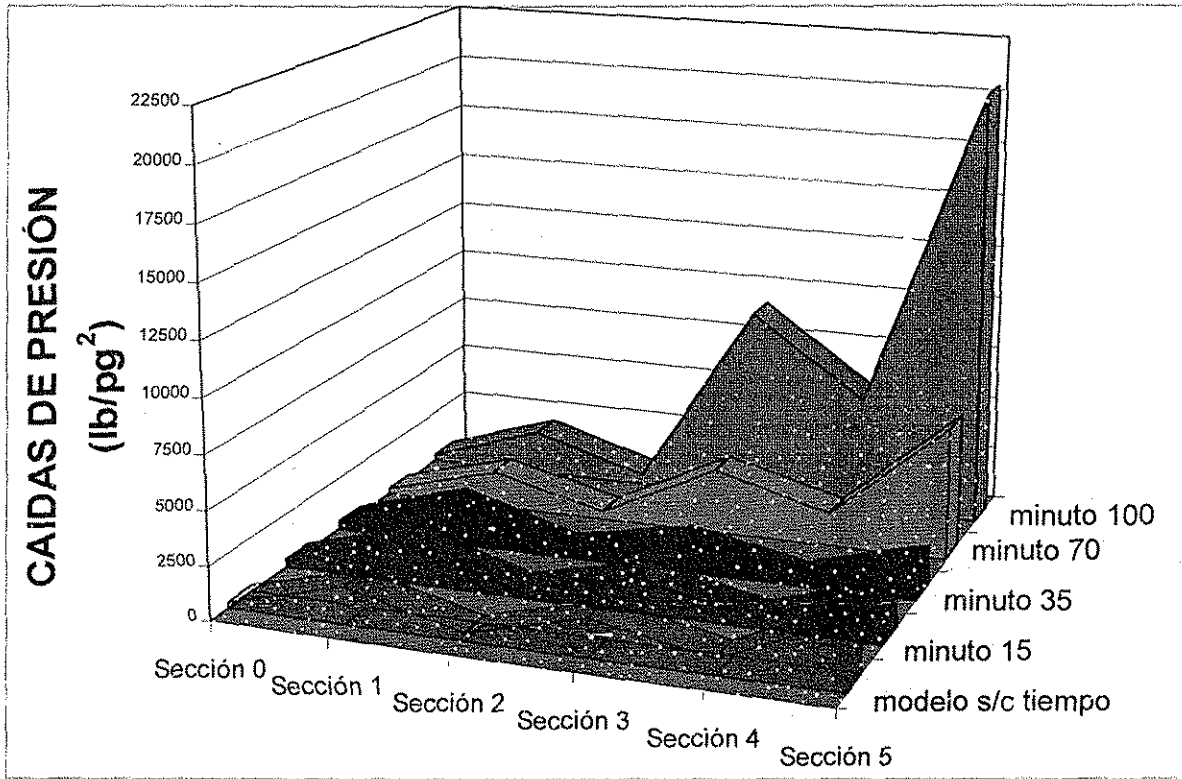
**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

<b>MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 70 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE °C DINÁMICA</b>						
Caida de Presión (psi)	No. De Sección	Long. Secc. (m)	Tipo de Sección	GASTO (GAL/MIN)	Caida de Presión parásita del sist. (psi)	Potencia de la bomba Pp <sup>o</sup> /1714 (H.P.)
267.13	Sección 0	133	conex.sup.	252	13154.74	1934.43
1695.78	Sección 1	3889	Interior T.P.			
379.24	Sección 2	2348	Interior liner			
3030.54	Sección 3	1035	Agujero-liner			
1570.80	Sección 4	1313	T.R.-liner			
6211.25	Sección 5	3889	T.R.-T.P.			
13154.74						

<b>MODELO DE LEY DE POTENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LOS 100 MINUTOS DE BOMBEO Y UNA TEMPERATURA DE °C DINÁMICA</b>						
Caida de Presión (psi)	No. De Sección	Long. Secc. (m)	Tipo de Sección	GASTO (GAL/MIN)	Caida de Presión parásita del sist. (psi)	Potencia de la bomba Pp <sup>o</sup> /1714 (H.P.)
302.37	Sección 0	133	conex.sup.	252	37928.44	5577.46
2065.58	Sección 1	3889	Interior T.P.			
484.53	Sección 2	2348	Interior liner			
9145.31	Sección 3	1035	Agujero-liner			
5412.25	Sección 4	1313	T.R.-liner			
20518.40	Sección 5	3889	T.R.-T.P.			

**Tabla A-7 Caídas de presión en el sistema y potencia de la bomba con los dos modelos**

**CAIDAS DE PRESIÓN EN LAS SECCIONES 0 A 5  
CON EL MODELO DE LEY DE POTENCIAS Y EL  
MODELO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura A-2 Caídas de presión en la secciones 0 a 5.

Con estos cálculos se obtuvo la cédula de bombeo para la operación de cementación

CEDULA DE BOMBEO						
TIEMPO (min)	VOLUMEN (litros)	VOLUMEN (galones)	PROFUNDIDAD (metros)	PRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	PRESIÓN (lb/pg <sup>2</sup> )	POSICIÓN LECHADA
15	14307	3780	1804	244	3458	INTERIOR T.P.
30	33384	8820	4180	564	8013	INTERIOR T.R.
70	66767	17640	4808	25	355	ESP. ANULAR
100	95382	25200	3360	38	536	ESP. ANULAR

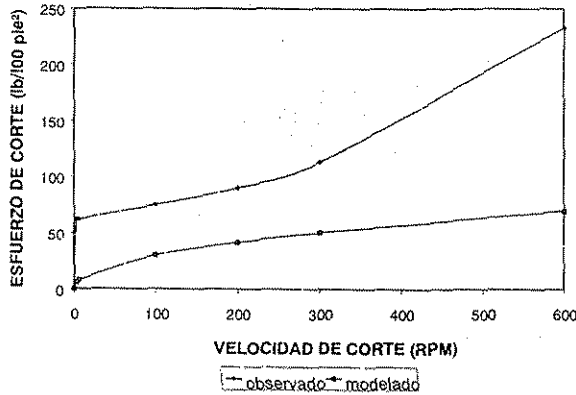
Tabla A-6 Cédula de bombeo obtenida con el modelo de Ley de Potencias en función del tiempo

**CURVAS DE LAS PRUEBAS REOLÓGICAS Y LAS OBTENIDAS CON EL MODELO REOLÓGICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

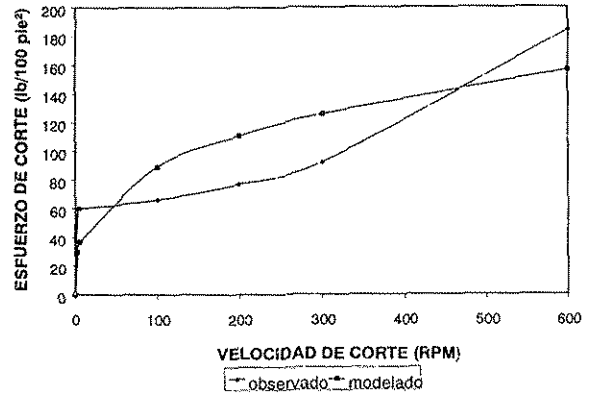
Se presentan las curvas reológicas para tres niveles de presión a la temperatura de 136°C observada en los pozos de la Región Sur.

**PRIMER NIVEL 6000 PSI Y 136°C**

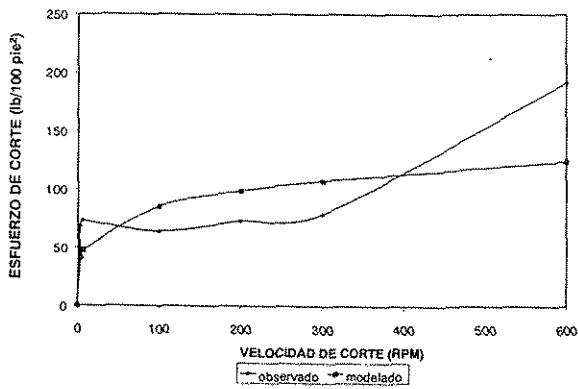
PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 5



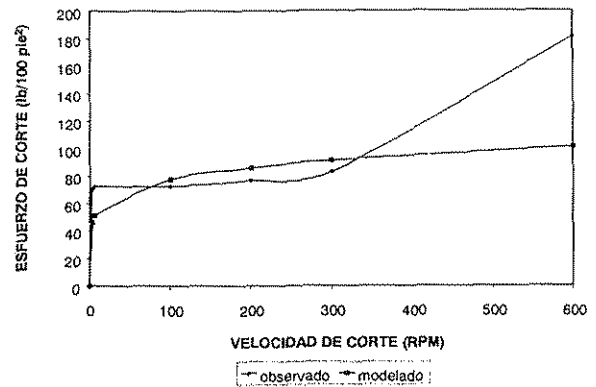
PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 10



PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 15



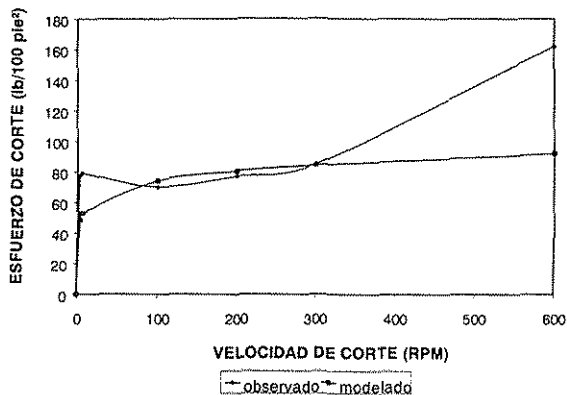
PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 20



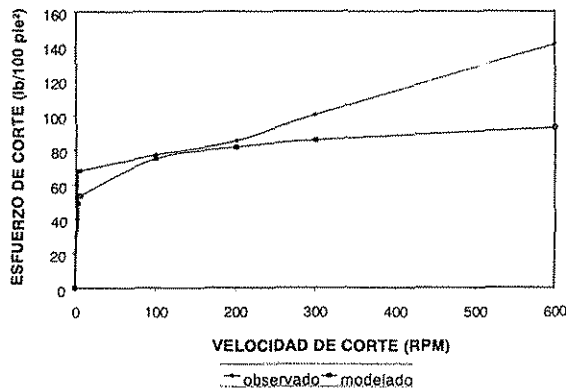


ANEXO "B" CURVAS REOLÓGICAS DE LAS PRUEBAS Y EL MODELO

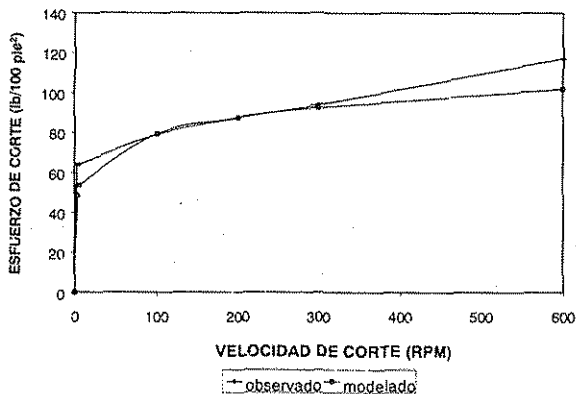
PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 25



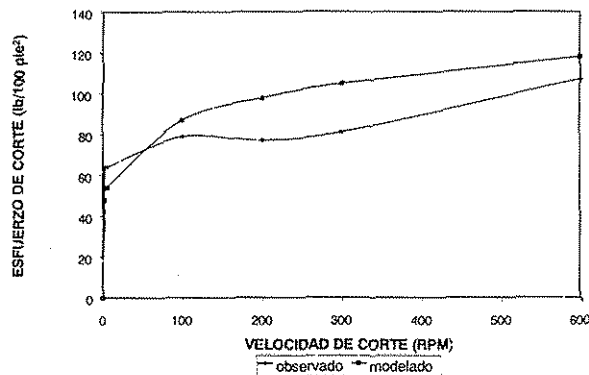
PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 30



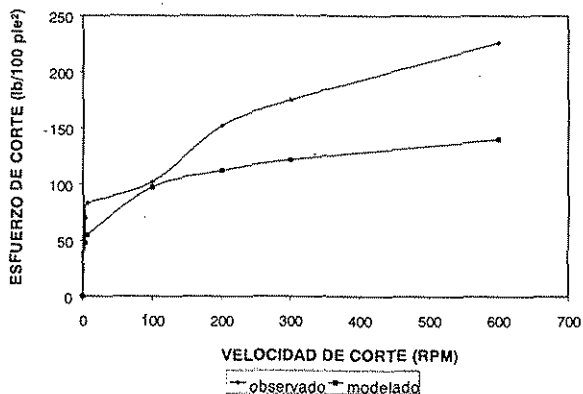
PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 35



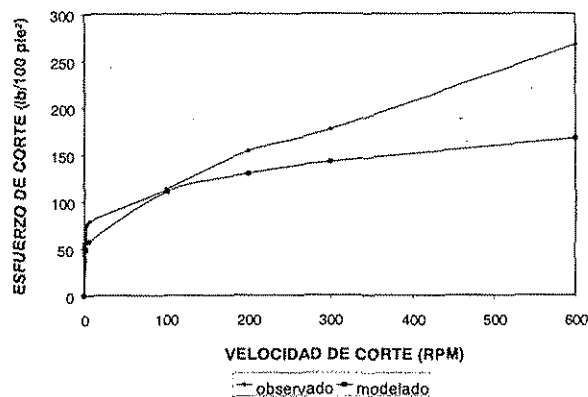
PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 40



PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 45



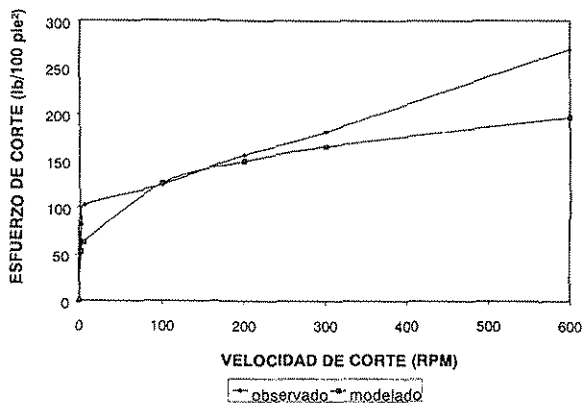
PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 50



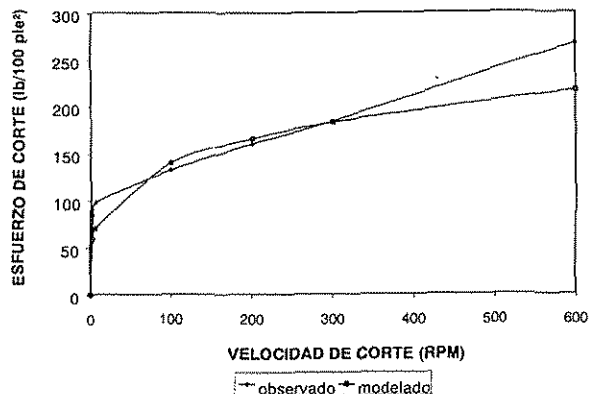
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANEXO "B" CURVAS REOLÓGICAS DE LAS PRUEBAS Y EL MODELO

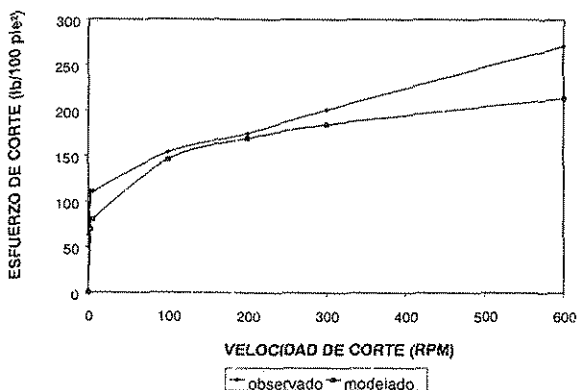
PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 55



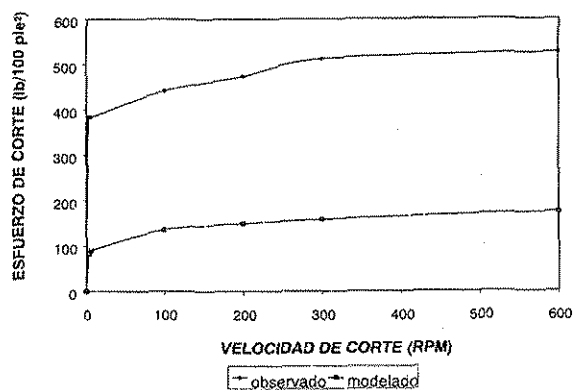
PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 60



PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 65

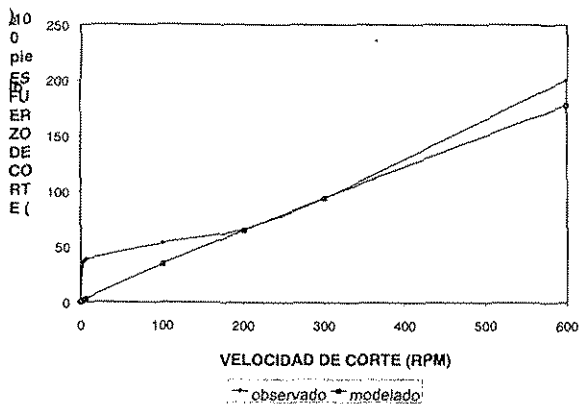


PRUEBA REOLÓGICA No. 2 MINUTO 70

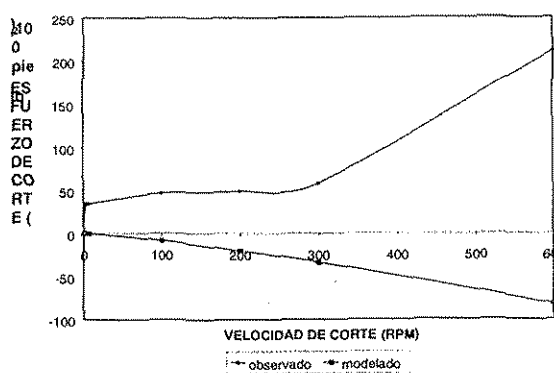


SEGUNDO NIVEL 1200 Y 136°C

PRUEBA REOLÓGICA No. 3 MINUTO 5

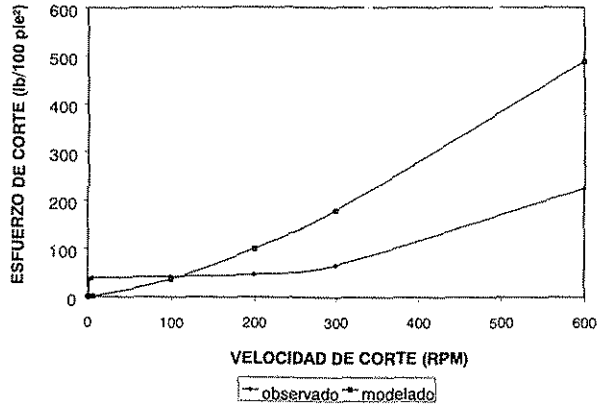


PRUEBA REOLÓGICA No. 3 MINUTO 10

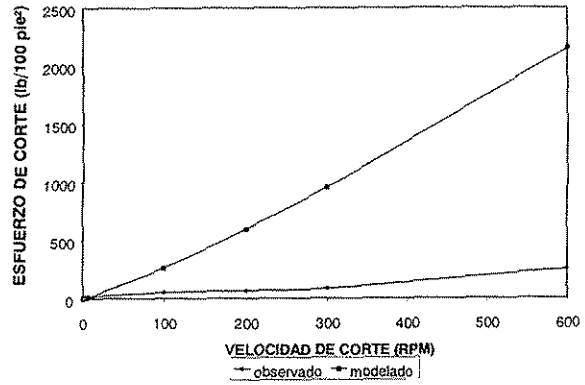


**ANEXO "B" CURVAS REOLÓGICAS DE LAS PRUEBAS Y EL MODELO**

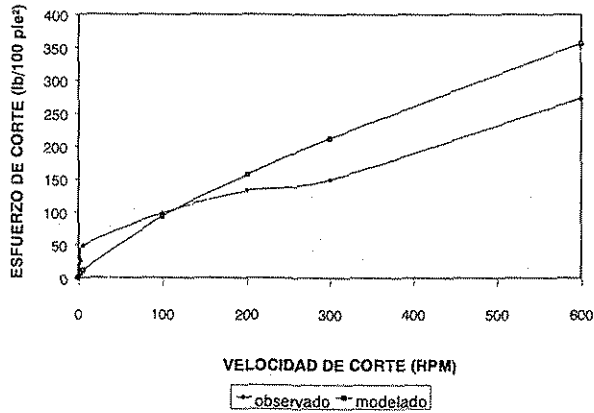
PRUEBA REOLÓGICA No. 3 MINUTO 20



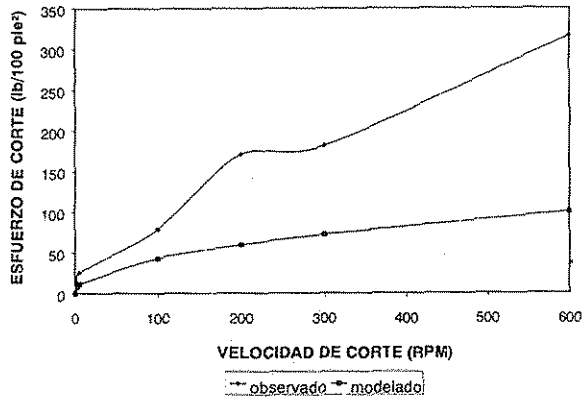
PRUEBA REOLÓGICA No. 3 MINUTO 30



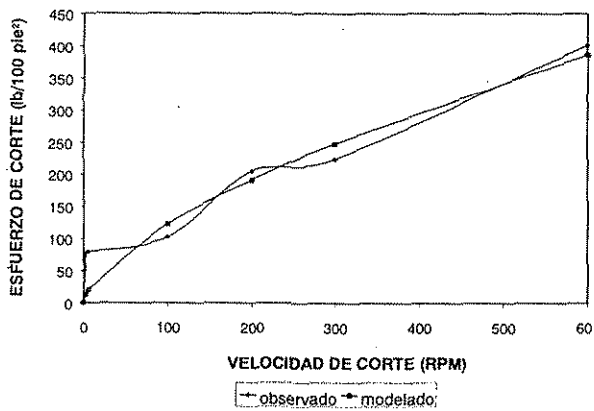
PRUEBA REOLÓGICA No. 3 MINUTO 40



PRUEBA REOLÓGICA No. 3 MINUTO 50



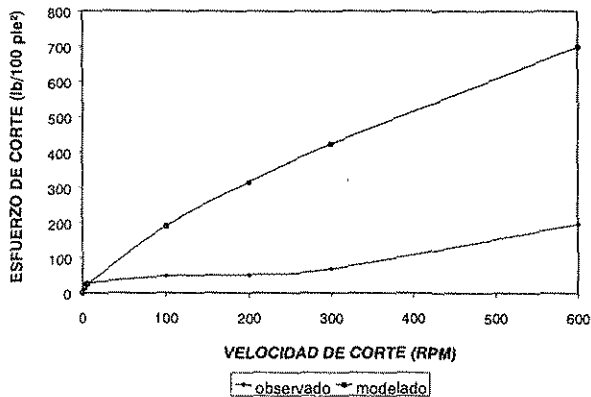
PRUEBA REOLÓGICA No. 3 MINUTO 60



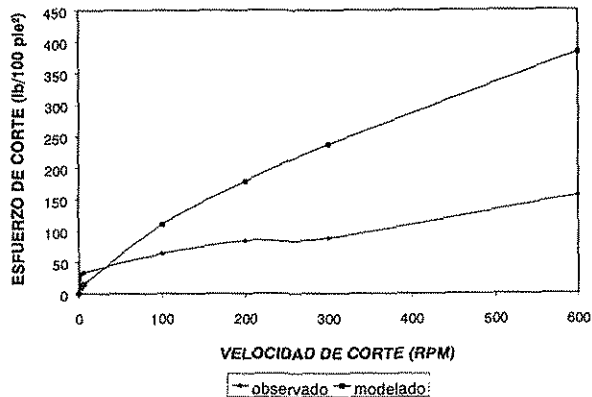
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TERCER NIVEL DE PRESIÓN 18800 PSI Y 136°C

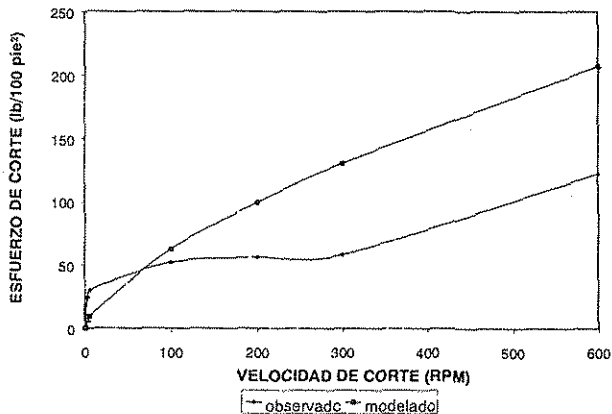
PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 5



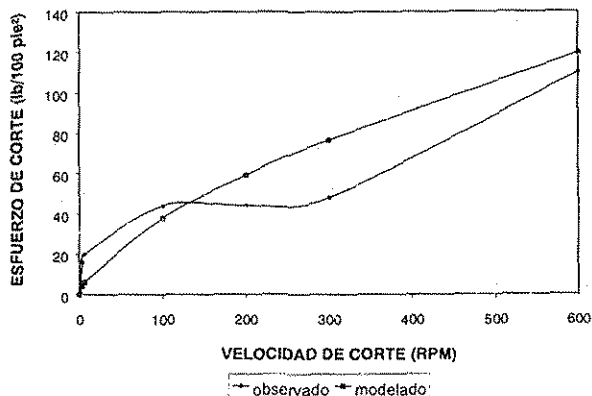
PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 10



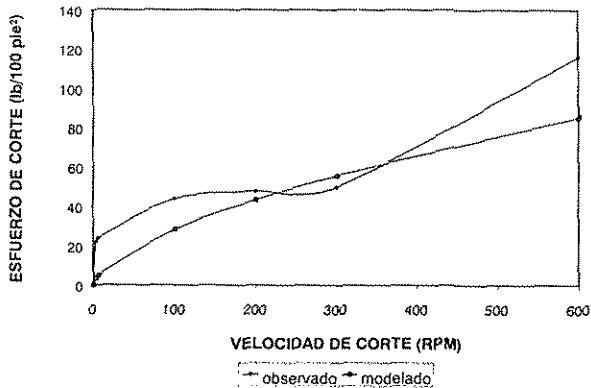
PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 15



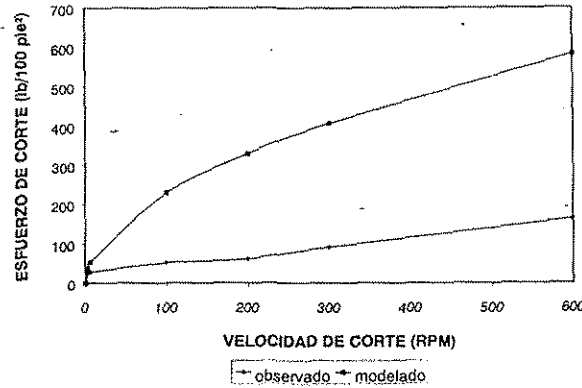
PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 20



PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 25

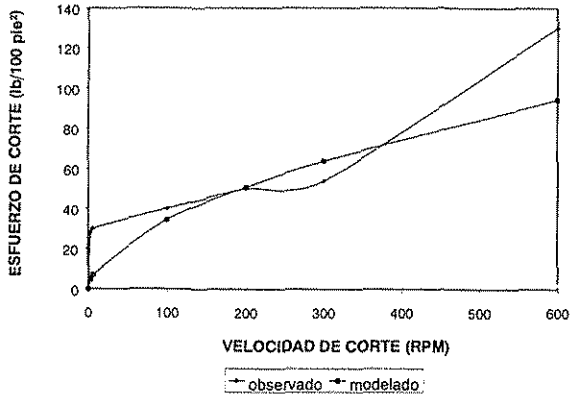


PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 30

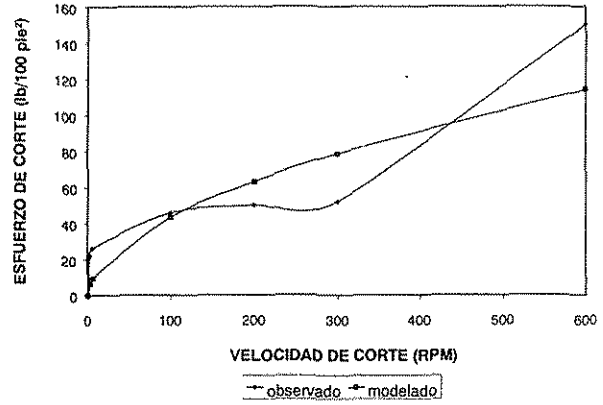


ANEXO "B" CURVAS REOLÓGICAS DE LAS PRUEBAS Y EL MODELO

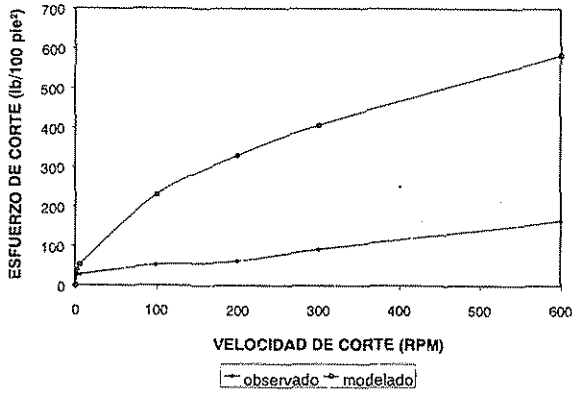
PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 30



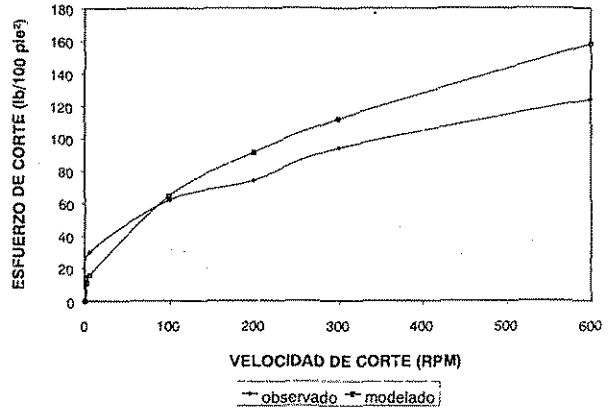
PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 40



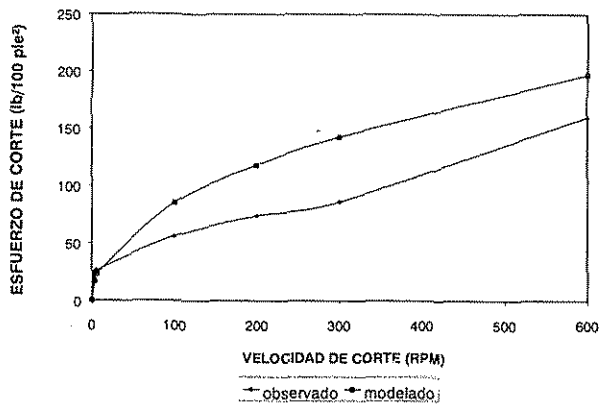
PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 45



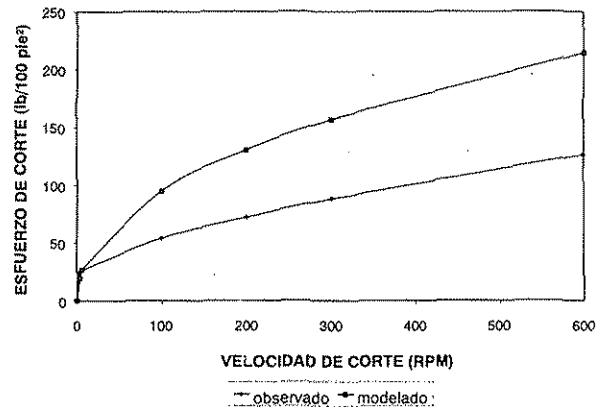
PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 50



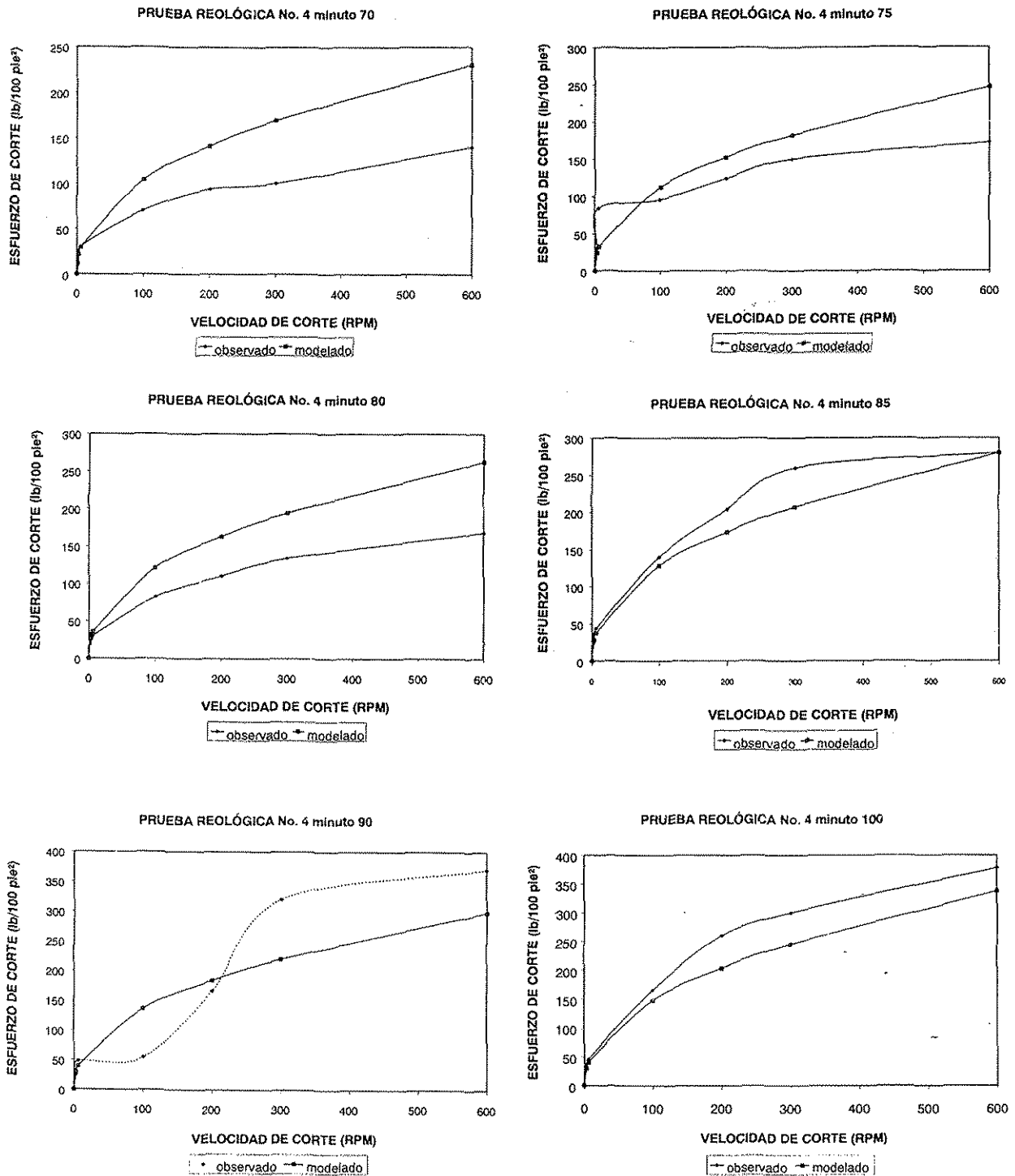
PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 60



PRUEBA REOLÓGICA No. 4 minuto 65



**ANEXO "B" CURVAS REOLÓGICAS DE LAS PRUEBAS Y EL MODELO**



En la Figura B-1 se muestra las velocidades típicas que se pueden presentar en los sistemas de circulación de los pozos, donde se observa que el rango de interés de las velocidades de corte es de 6 a 300 RPM.

## VELOCIDADES DE CORTE TÍPICAS DE LOS SISTEMAS DE CIRCULACIÓN EN POZOS

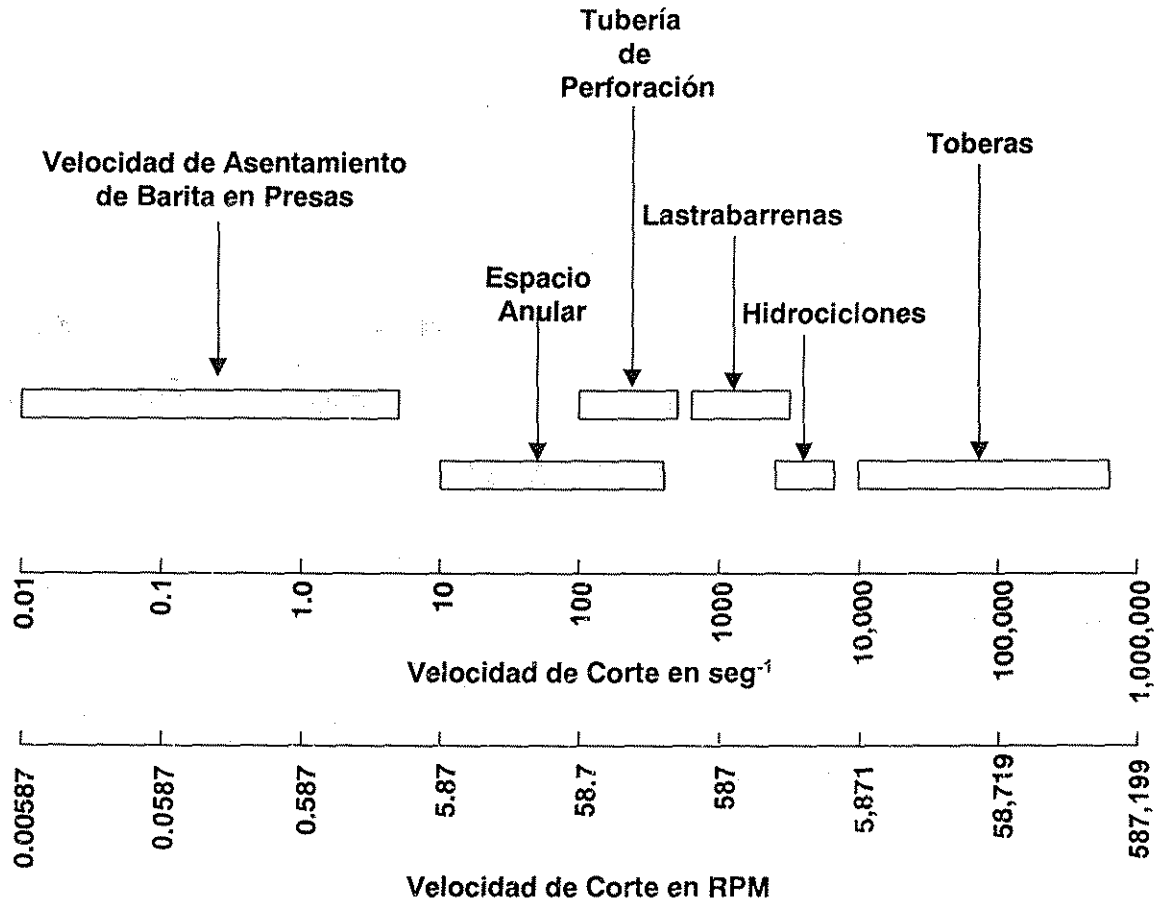


Figura B-1 Velocidades de Corte en el sistema

## FUNDAMENTO TEÓRICO PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE REGRESIÓN NO LINEAL

En términos generales la estimación no lineal calcula la relación entre las variables independientes y las variables dependientes, es decir entre el efecto y la consecuencia, este tipo de problemas son comunes en el análisis de regresión múltiple o el análisis de varianza y es factible pensar que una estimación no lineal es una generalización de estos métodos. Específicamente la regresión múltiple supone que la relación entre las variables independientes y las dependientes es lineal, en cambio en la regresión no lineal, se puede establecer la naturaleza de la relación y especificar que la variable dependiente sea una función logarítmica de la variable independiente, una función exponencial o una relación compleja de las mediciones independientes o cualquier combinación de las anteriores. En general todos los modelos de regresión pueden ser definidos como:

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Cuando se permite cualquier relación entre las variables independientes y dependientes se debe tener en mente, el tipo de relación más conveniente para su interpretación y que permita su predicción.

Si se desea conocer la relación entre la variable dependiente y una lista de variables independientes, la variable dependiente o de respuesta esta representada por  $f(x, \dots)$  donde las  $x$  son las variables independientes.

El siguiente representa un modelo de regresión lineal múltiple:

$$y= a+b_1*x_1+b_2*x_2+\dots+b_n*x_n.$$

Una estimación no lineal permite especificar cualquier tipo de modelo de regresión continua o discontinua, algunos de los modelos de regresión no lineales más comunes son: (crecimiento exponencial, probabilístico, logístico y regresión con un punto de quiebre).

Algunos modelos de regresión que no pueden ser linealizados, solo se pueden estimar mediante la estimación no lineal.

### MODELO GENERAL DE REGRESIÓN

El modelo general de crecimiento es similar al anteriormente considerado:

$$y=b_0+b_1*e^{(b_2*x)}+E$$



Este modelo es comúnmente usado en estudios de cualquier tipo de crecimiento (y) cuando el ritmo de crecimiento a cualquier punto en un tiempo (x) es proporcional a la cantidad de crecimiento remanente. El parámetro  $b_0$  en este modelo representa el máximo valor de crecimiento. Un ejemplo típico de este modelo puede ser adecuado cuando se busca describir la concentración de una sustancia como una función del tiempo.

### MODELOS PARA RESPUESTAS BINARIAS: PROBABILÍSTICO Y LOGARITMICO.

No es común que una variable dependiente sea de naturaleza binaria ya que esta solo puede tener dos posibles valores. Por ejemplo cada paciente recupera o no recupera su salud; en los trabajos los empleados aprueban o no aprueban exitosamente un examen; los subscriptores a una revista renuevan o no su suscripción, de modo que uno puede crear una variable con un 0 o un 1 lo cual indica que la suscripción se renovó, así la restricción del rango a valores binarios es ignorada, si uno usa, procedimientos de regresión múltiple.

### MODELO DE REGRESIÓN LOGÍSTICO.

Este modelo predice valores para la variable dependiente que nunca deben ser menores o iguales a 0 ni mayores o iguales a 1, a pesar de los valores de las variables independientes, esto se consuma por la aplicación de la siguiente ecuación de regresión que actualmente tiene un profundo significado como veremos a continuación (el término logístico fue propuesto por Berkson, 1944).

$$y = \frac{e^{(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n)}}{1 + e^{(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n)}}$$

Uno puede reconocer fácilmente que a pesar de los coeficientes de regresión o la magnitud de los valores de x, el modelo siempre va a predecir valores de y en el rango de 0 y 1.

El nombre logístico viene de que el modelo puede ser fácilmente linealizado mediante una transformación logarítmica. Suponga que pensamos en una variable dependiente binaria y en términos de 0 a 1. Podemos transformar la probabilidad p como:

$$p' = \log \left\{ \frac{p}{(1-p)} \right\}$$

Esta transformación es una transformación logarítmica. Note que  $p'$  puede teóricamente suponer cualquier valor entre  $-\infty$  (infinito) y  $+\infty$  (infinito). Por lo tanto la transformación logarítmica es la consecuencia de las fronteras entre 0/1 para la variable dependiente original (probabilidad), se pueden usar (transformaciones logarítmicas) con valores en una ecuación ordinaria de regresión lineal. En realidad el comportamiento de la transformación sobre ambos lados de la ecuación de regresión

logarítmica es más rápido, con lo que obtendremos el modelo de regresión lineal estándar.

$$p' = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_n * x_n$$

### MODELO DE REGRESIÓN PROBABILÍSTICO.

Se puede considerar una variable de respuesta binaria como resultado de una distribución normal independiente que actualmente tiene rangos de  $-\infty$  (infinito) a  $+\infty$  (infinito). Por ejemplo un suscriptor a una revista puede sentirse muy seguro a cerca de no renunciar a su suscripción o sentirse muy a favor de renunciar a ella. En cualquier caso (los editores de la revista) observaran una respuesta binaria de renovar o renunciar a la suscripción. De cualquier modo nosotros pondremos establecer siempre una ecuación de regresión lineal sobre la variable principal del sentimiento o actitud, y podremos escribir la ecuación, por lo cual es razonable suponer que la variable sentimiento esta normalmente distribuida y que la probabilidad  $p$  de renovar la suscripción esta igual o relativamente espaciada bajo la curva normal. Por lo tanto transformamos cada lado de la ecuación tal que refleje las probabilidades normales que obtenemos:

$$PN(\text{Sentimiento}) = PN(b_0 + b_1 * x_1, \dots)$$

Donde PN es la probabilidad normal de cada una de las variables (bajo el espacio de la curva normal), como esta tabulada prácticamente en todos los textos estadísticos. La ecuación anterior también esta referida como modelo de regresión probabilístico y el término se le debe a Bliss, 1934).

### MODELO DE REGRESIÓN EXPONENCIAL.

El software estadística calcula estimaciones no lineales usando mínimos cuadrados y el modelo:

$$y = c + e^{(b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_m * x_m)}$$

donde:

$c$ , y  $b_i$  son parámetros (para las  $m$  variables independientes)

Este modelo es comúnmente usado para el estudio del crecimiento de poblaciones.

### MODELO DE PUNTO DE QUIEBRE.

Cuando usted selecciona este modelo de regresión no lineal, ESTADISTICA lo estimará usando el siguiente modelo.

$$y = (b_{01} + b_{11} * x_1 + \dots + b_{m1} * x_m) * (y \leq b_n) + (b_{02} + b_{12} * x_1 + \dots + b_{m2} * x_m) * (y \geq b_n)$$

Por lo tanto para esta opción el programa estima por separado 2 ecuaciones de regresión lineal; una para valores  $y$  que son menores o iguales al punto de quiebre ( $b_0$ ) y uno para valores de  $y$  que son mayores que el punto de quiebre.

### MODELO DE REGRESIÓN POLINÓMICA.

El modelo de regresión polinómica es un modelo de regresión no lineal común, que coloca los términos no lineales citados aquí porque la naturaleza de este modelo es lineal. Suponga que deseamos medir experimentalmente el comportamiento psicológico al despertar de varios sujetos y su comportamiento sobre una compleja serie de tareas de localización. Basadas sobre la ley de aprendizaje Yerkes-Dodson ley que espera una relación curvilínea entre el comportamiento al despertar, esta predicción puede ser esperada en la siguiente ecuación.

$$\text{Comportamiento} = a + b_1 * \text{Despertar} + b_2 * \text{Despertar}^2$$

En esta ecuación  $a$  representa la intersección y  $b_1$  y  $b_2$  son coeficientes de regresión. La no linealidad de estos modelos se expresa en el termino  $\text{Despertar}^2$ . De cualquier modo la naturaleza del modelo, es lineal, excepto que cuando se estimó este, nosotros podíamos medir la variable  $\text{Despertar}^2$ . La opción de regresión múltiple fija no lineal puede también ser usada para estimar los coeficientes de regresión para este modelo. Estos tipos de modelos, se incluyen con algunas transformaciones de las variables independientes en una ecuación lineal y es también referida a modelos con variables que no son lineales.

### PROCEDIMIENTOS DE ESTIMACIÓN NO LINEAL.

#### ESTIMACIÓN POR MINIMOS CUADRADOS.

El software STATISTICA 5.1 tiene su fundamento teórico en los siguientes procedimientos de análisis estadístico para regresiones no lineales.

#### PROCEDIMIENTO DE ESTIMACIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS

En términos generales la estimación por mínimos cuadrados se basa en la minimización de la suma de los cuadrados de las desviaciones de los valores observados para la variable dependiente que se van a predecir por el modelo (Legendre 1805).

#### FUNCIÓN ERROR.

En la regresión múltiple se estiman los coeficientes de regresión al encontrar los coeficientes que minimizan la varianza residual (suma de los cuadrados residuales) alrededor de la regresión lineal. Cualquier desviación de un valor observado de un

valor predecido, significa un error en la precisión de la predicción. Así se puede decir que el éxito de los mínimos cuadrados se basa en la minimización de la función error. La función error se define como la suma de los cuadrados de las desviaciones alrededor de los valores predecidos (Wald 1939). Cuando se minimiza esta función obtenemos los parámetros estimados como los que se obtienen en una regresión múltiple (intersección, coeficientes de regresión). Una estimación no lineal contiene varios métodos de minimización de funciones, que pueden ser usados para minimizar cualquier tipo de función error.

$$F(\text{error}) = (\text{Observado} - \text{Predecido})^2 * \left(\frac{1}{x}\right)^2$$

### **METODO DE MÍNIMOS CUADRADOS PARA VALORES REPRESENTATIVOS.**

Los mínimos cuadrados representativos son el método más común usado que supone una varianza residual alrededor de la línea de regresión, es la misma a través de todos los valores de las variables independientes. Por otro lado suponga que el error de la varianza en la medición de cada caso es idéntico, frecuentemente no se supone un valor real, en particular se viola lo que ocurre en los negocios, la economía o a las aplicaciones biológicas (note que los mínimos cuadrados representativos, estiman parámetros que pueden ser calculados por regresión múltiple. Suponga que buscamos encontrar la relación entre el costo programado de los proyectos de construcción y el costo actual. Puede ser usual esperar costos más altos. En este caso es razonable suponer que la magnitud del valor absoluto por la cantidad cerrada es proporcional al tamaño del proyecto. Por lo tanto podemos usar la función de mínimos cuadrados representativos para ajustar un modelo de regresión lineal. Por lo tanto la función error nos da los cuadrados residuales y el peso de este error por el inverso de su valor al cuadrado de la variable independiente x para cada caso. El programa supondrá valores de error para cada caso y estima los parámetros que minimizan la suma. Este método obtiene estimaciones de parámetros de regresión más estables (Neter, Wasserman y Kutner 1985).

### **METODO DE MAXIMIZACIÓN DE LA FUNCIÓN DE PROBABILIDAD.**

Una alternativa a la función de mínimos cuadrados representativos es la maximización de la función de probabilidad (L) (Fisher 1922) y se define de la siguiente manera.

$$L = F(Y, \text{model}) = \prod_{i=1}^n \left\{ p \left[ y_i, \text{Parámetros del modelo}(x_i) \right] \right\}$$

En teoría se puede calcular la probabilidad de los valores específicos de la variable dependiente que puede ocurrir en la muestra, dado el modelo respectivo de regresión. Suponiendo que todas las observaciones son independientes una de la otra esta función de probabilidad es la suma geométrica  $\Pi$  (desde 1 hasta n) de las

probabilidades de cada observación individual "i" a ocurrir, dado el modelo respectivo y los parámetros para los valores x (la media de la suma geométrica que podemos multiplicar por de las probabilidades individuales para cada caso) es costumbre también expresar esta función como un logaritmo natural en cuyo caso la suma geométrica será una suma aritmética. Los cálculos para cada modelo particular son complicados porque es necesario calcular las probabilidades de los valores a predecir y dado el modelo y el valor respectivo de x. Como el método de mínimos cuadrados para valores representativos da idénticos valores que el método de maximización de la función de probabilidad y por lo tanto supone un error igual entre sus varianzas.

### **MÉTODOS DE MAXIMIZACIÓN DE LA FUNCIÓN DE PROBABILIDAD Y MODELOS DE REGRESIÓN PROBABILÍSTICO Y LOGÍSTICO.**

La maximización de la función de probabilidad se trabaja en este software con los modelos de regresión probabilístico y logístico específicamente la función error para estos modelos se calcula como la suma del logaritmo natural de la función de probabilidad para los modelos probabilístico y logístico que esta dado por las siguientes ecuaciones

$$\log(L_1) = \sum_{i=1}^n [y_i * \log(p_i) + (1 - y_i) * \log(1 - p_i)]$$

donde:

$\log(L_1)$ : Es el logaritmo natural de la función de probabilidad.

$y_i$  : son los valores observados de la variable dependiente.

$p_i$ : es la probabilidad de los valores predecidos y esta entre 0 y 1.

$$\log(L_o) = n_o * \left( \log\left(\frac{n_o}{n}\right) \right) + n_1 * \left( \log\left(\frac{n_1}{n}\right) \right)$$

donde:

$\log(L_o)$ : Es el logaritmo natural de la función de probabilidad del modelo nulo.

$N_o$  : es el numero de observaciones con valor 0

$N_1$  : es el numero de observaciones con valor 1

$N$  : es el número total de observaciones

La maximización de la función de probabilidad automáticamente usa los modelos probabilístico y logístico y no se necesita tipear fórmulas tan complejas como la función error, sin embargo el software puede evaluar cualquier fórmula propuesta.

## ALGORITMOS DE MINIMIZACIÓN DE FUNCIONES.

Ahora que se han discutido los diferentes modelos de regresión y las funciones error que usan, la única incógnita que existe es como minimizar las funciones error para encontrar los mejores parámetros de predicción y como estimar los errores estándar para los parámetros estimados. La estimación no lineal utiliza un algoritmo muy eficiente (Cuasi Newton) que aproxima las derivadas de segundo orden de la función error para guiar la búsqueda del mínimo, es decir el mejor parámetro estimado dada la función error respectiva. Además la estimación no lineal ofrece varias funciones y algoritmos de minimización más generales para seguir diferentes estrategias de búsqueda que no dependen de las derivadas de segundo orden. Estas estrategias son algunas veces más efectivas para la estimación de las funciones error con mínimos locales, estos métodos son con frecuencia particularmente útiles para encontrar valores iniciales apropiados para la estimación por el método de cuasi Newton.

En todos los casos STATISTICA puede calcular ( si se requiere para su uso) los errores estándar de los parámetros estimados que son calculados por aproximación de diferencias finitas. En caso de que un procedimiento de estimación iterativa falle al converger se producirán parámetros estimados muy pequeños o muy grandes.

## CRITERIOS DE CONVERGENCIA, VALORES INICIALES Y TAMAÑO DE PASO.

Un aspecto común de todos los procedimientos de estimación, es que estos requieren el uso específico de algunos valores iniciales, tamaños de paso y criterios de convergencia. Todos los métodos comienzan con los valores iniciales que son sustituidos de una manera sistemática de iteración a iteración; en la primera iteración, el tamaño de paso está determinado por muchos otros parámetros que serán movidos. Finalmente el criterio de convergencia se determina cuando el proceso de iteración finaliza. Por ejemplo el proceso puede ser parado cuando se mejora la función error en cada una de las iteraciones a menos que se especifique una cantidad específica. La estimación no lineal tiene varios parámetros por regla que los sustituyen apropiadamente en la mayoría de los casos.

## PARÁMETROS DE LIMITACIÓN Y FUNCIONES DE CASTIGO.

Todos los procedimientos de estimación no lineales por naturaleza no están limitados, y los límites son los medios por los cuales el programa los moverá alrededor de los parámetros sin considerar cualquier otro valor o resultado no permisible. Por ejemplo en el proceso de regresión logística, se pueden estimar valores iguales a 0 en cuyo caso no se puede calcular el logaritmo (ya que el logaritmo de 0 no esta definido). Cuando esto sucede el programa aplica una función de castigo a la función error el cual es un valor muy grande. Como resultado de varios procedimientos de estimación usualmente se mueve lejos de las regiones que producen estas funciones. De cualquier modo en algunas circunstancias la estimación se conseguirá y como resultado usted podrá ver valores muy grandes de la función error. Esto puede pasar si por ejemplo la ecuación de regresión incluye el logaritmo de una variable independiente que tiene valor de cero para algunos casos (tal como en el caso de que no pueda ser calculado el logaritmo).

Si el usuario desea usar límites en un procedimiento de estimación no lineal, entonces los límites deben ser especificados en la función error como una función de castigo declarada. Haciendo esto el usuario puede controlar que valores permisibles de los parámetros a ser estimados que pueden ser manipulados por el programa. Por ejemplo si dos parámetros a y b limitados a ser mayores o iguales a 0, entonces uno debe evaluar un gran castigo a estos parámetros si esta condición no se conoce a continuación se menciona un ejemplo de una regresión específica del usuario y una función error, incluyendo un castigo asignado designado para penalizar el parámetro a y/o b si cada uno no es mayor o igual a cero.

Función a estimar:

$$v_3 = a + b * v_1 + (c * v_2)$$

Función error:

$$L = (obs - pred)**2 + (a < 0)*100000 + (b < 0)*100000$$

### MINIMOS LOCALES.

Lo mejor para no limitar la minimización de la función es un mínimo local. Por ejemplo una función error particular puede ser significativamente grande a pesar de todo, cómo un parámetro particular es movido. Por otro lado si el parámetro fue movido a un lugar completamente diferente la función error debe ser en esa iteración más pequeña. De cualquier modo en aplicaciones más prácticas, los mínimos locales producen estimaciones de parámetros excesivamente grandes o pequeños con errores estándar muy grandes. En cuyo caso se especifican diferentes valores iniciales y se trata otra vez. Note también que el método es particularmente ingenioso, evitando cada mínimo. Por otro lado este método puede ser particularmente conjuntado con otro para encontrar valores iniciales apropiados para funciones complejas.

### METODO DE CUASI NEWTON.

Como se puede recordar la pendiente en un punto particular de una función se obtiene calculando la primera derivada en ese punto particular de la función. La pendiente de la pendiente se obtiene con la derivada de segundo orden, que nos dice en realidad que tan rápido cambia la pendiente en un punto respectivo y en que dirección. El método de cuasi Newton evalúa para cada paso la función a diferentes puntos estimando las derivadas de primero y segundo orden y usando esta información para seguir una ruta hacia la minimización de la función error.

### PROCEDIMIENTO SIMPLEX.

Este algoritmo no depende de los cálculos o la estimación de las derivadas de la función error. En su lugar en cada iteración la función será evaluada en m+1 para el m

espacio dimensional de parámetros. Por ejemplo en dos dimensiones (es decir hay 2 parámetros a ser estimados) el programa evaluará la función en esos 3 puntos alrededor del óptimo actual. Estos 3 puntos pueden definir un triángulo; en más de 2 dimensiones, 3 puntos que definirán que camino tomar en que dirección del espacio de 2 dimensiones para proceder a minimizar la función. El mismo principio puede ser aplicado a un espacio de parámetros multidimensional, que es el método SIMPLEX que se moverá hacia el mínimo cuando el tamaño de paso actual sea también crudamente detectando una dirección mínima más limpia (es decir SIMPLEX es muy grande) el método SIMPLEX se contraerá y tratará otra vez.

Adicionalmente la resistencia de este método es que cuando aparece un mínimo tendrá que ser encontrado, el método SIMPLEX tratará otra vez de expandirse a un tamaño mayor para ver el ambiente del mínimo respectivo como un mínimo local. De la misma manera el método simplex se mueve como un fluido de un organismo a la celda más simple y menor de la función error contrayéndose y expandiéndose como un mínimo local o la cresta más significativamente encontrada.

### **PATRONES DE MOVIMIENTO HOOKE-JEEVES.**

Por sentido común este es el más simple de todos los algoritmos. En cada iteración este método primero define un patrón de puntos moviendo cada parámetro uno a uno hasta optimizar la función error. El patrón de entrada de puntos se cambia o se mueve a una nueva localización; esta nueva localización se determina por extrapolación de la línea anterior de puntos base en el espacio de los  $m$  parámetros adimensionales para los nuevos puntos base.

El tamaño de paso en este procedimiento se ajusta constantemente a cero sobre el óptimo respectivo. Este método es muy eficiente, y se pueden intentar ambos métodos el simplex y el cuasi Newton para tratar de producir estimaciones razonables.

### **BUSQUEDA DEL PATRÓN ROSENBROCK.**

Cuando todos los otros métodos fallan el método de búsqueda del patrón Rosenbrock frecuentemente es exitoso. Este método rota el espacio de parámetros y alinea los ejes con una cresta (este método también es conocido como rotación de coordenadas); todos los otros ejes se ajustarán a la ortogonalidad de estos. Si la función error es unimodal y tiene una cresta detectable los puntos aproximarán el mínimo de la función, este método procederá en forma segura y precisa al mínimo de la función. De cualquier forma note que la investigación de este algoritmo puede terminar muy pronto cuando hay varios límites de frontera (resultando en valores de castigo) que se intersectan y dirigen a una discontinuidad en las crestas.

### **METODO DE LA MATRIZ HESSIANA Y ERRORES ESTÁNDAR.**

La matriz de segundo orden de derivadas parciales es también conocida como matriz Hessiana. Este método regresa la inversa de la matriz Hessiana aproximada a los parámetros estimados de la matriz de varianza/covarianza.



Intuitivamente esta puede ser una relación inversa entre la derivada de segundo orden para un parámetro y un error estándar. Si el cambio de pendiente alrededor del mínimo de la función es muy marcado, entonces la derivada de segundo orden será mayor; de cualquier modo el parámetro estimado será muy estable en el sentido de que el mínimo con respecto al parámetro es claramente identificable. Si la derivada de segundo orden es cero entonces el cambio en la pendiente alrededor del mínimo es cero y significa que prácticamente podemos mover los parámetros en cualquier dirección sin afectar significativamente la función error. Por lo tanto la función error de los parámetros será muy grande.

La matriz Hessiana y los errores estándar para los parámetros se calculan por separado mediante la aproximación de diferencias finitas seleccionando la opción de errores estándar asintóticos para todos los métodos de estimación.

### ANÁLISIS DE VARIANZA.

El análisis de varianza se utiliza para comprobar el ajuste de los modelos de regresión de un experimento y consiste en probar las diferencias significativas entre las medias (para grupos de variables) a un nivel de significación. El análisis de varianza está acompañado por la partición de la varianza total dentro de los componentes que son debidos al acierto o error aleatorio (es decir dentro del grupo SS) y los componentes que son debidos a las diferencias entre las medias. Estos últimos componentes son probados mediante una significación estadística y si son significativos se ejecuta la hipótesis nula de las diferencias entre las medias y se acepta la hipótesis alternativa de que las medias de la población son diferentes para cada una de las otras.

### PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE REGRESIÓN CON MODELO DE REGRESIÓN LINEAL.

En este modelo de regresión una variable dependiente se relaciona con una variable  $x$  independiente y su relación está dada por la siguiente expresión.

$$y_i = \alpha + \beta x_i + e_i$$

donde:

$x_i$  y  $y_i$  son las observaciones del experimento para  $i=1,2,\dots,n$

la ecuación de regresión de  $y$  sobre  $x$  estará dada por:

$$\bar{y}_i = a + bx_i$$

donde :

$a$  y  $b$  son los coeficientes de correlación lineal, ordenada al origen y pendiente de la recta de regresión respectivamente.

Y donde:  $y_i$  y  $\bar{y}_i$  son el valor observado y el valor calculado del modelo y  $e_i$  es el error residual de la estimación y esta dado por:

$$e_i = y_i - a - bx_i$$

y donde  $a$  y  $b$  son estimadores de  $\alpha$  y  $\beta$  de forma que  $y_i - \bar{y}_i$  sea una variable que toma valores próximos a cero.

El problema que se plantea es entonces el de cómo calcular las cantidades  $a$  y  $b$  a partir de un conjunto de  $n$  observaciones de forma que se minimice el error. Las etapas en que se divide el proceso que vamos a desarrollar son de forma esquemática, las que siguen:

1. Dadas dos variables  $x$ ,  $y$ , sobre las que definimos

$$\bar{y}_i = a + bx_i$$

medimos el error que se comete al aproximar  $y$  mediante  $\bar{y}$  calculando la suma de las diferencias entre los valores reales y los aproximados al cuadrado (para que sean positivas y no se compensen los errores):

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}(x_i))^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2$$

2. Una aproximación  $\bar{y}_i = a + bx_i$  de  $y$  se define a partir de dos cantidades  $a$  y  $b$ . Vamos a calcular aquellas que minimizan la función

$$Error(a,b) = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2$$

3. Una vez que tenemos definido el error de aproximación las cantidades que lo minimizan se calculan derivando con respecto a ambas e igualando a cero, que es el procedimiento de mínimos cuadrados.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$(a,b) \text{ minimizan } (a,b) \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\text{Error}}{\partial a}(a,b) = 0 \\ \frac{\text{Error}}{\partial b}(a,b) = 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\text{Error}}{\partial a}(a,b) = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0 \\ \frac{\text{Error}}{\partial b}(a,b) = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)x_i = 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\text{Error}}{\partial a}(a,b) = -2 \sum_{i=1}^n e_i = 0 \\ \frac{\text{Error}}{\partial b}(a,b) = -2b \sum_{i=1}^n e_i x_i = 0 \end{cases}$$

A las ecuaciones anteriores se les denomina ecuaciones normales y son otra forma de escribir la función error, la cual podemos escribir de la siguiente manera para obtener a.

$$\sum_{i=1}^n y_i - an - b \sum_{i=1}^n x_i = 0 \Leftrightarrow a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Sustituyendo se tiene que:

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i - a \sum_{i=1}^n x_i - b \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i x_i - \bar{x}(\bar{y} - b\bar{x}) - b \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0$$

$$\Leftrightarrow S_{xy} - bS_x^2 = 0$$

lo que nos da las relaciones buscadas

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{S_{xy}}{S_x^2}$$

donde a y b son los coeficientes de regresión de y sobre x.



La medida del grado de relación se llama coeficiente de correlación y esta representado por la letra R que para este caso esta representado por la siguiente ecuación

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]}} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

## FUNCIÓN POTENCIA

Es el modelo de regresión no lineal que se aplica para una función potencia cuando los datos de las pruebas experimentales tienen la tendencia de ser una curva función potencia cuya ecuación de regresión es:

$$\bar{y} = ax_i^b$$

para facilitar el ajuste de esta curva función potencia se toman logaritmos de ambos miembros de la ecuación y con las propiedades de los logaritmos la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\log y_i = \log a + b(\log x_i)$$

Este resultado es una transformación doble log, porque ambas variables se expresan ahora en logaritmos. Si fijamos

$$\log \bar{y}_i = \bar{z}_i$$

$$\log a = c$$

$$\log x_i = \bar{w}_i$$

podemos escribir de nuevo la ecuación de regresión anterior como:

$$\bar{z}_i = c + b\bar{w}_i$$

que es una ecuación de regresión lineal simple de z sobre w. Por tanto para el cálculo real primero tomamos logaritmos de los valores y y x y después procedemos como en a regresión lineal simple. Aquí y z y  $\bar{z}$  son símbolos algebraicos no variables normales estándar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN