

2003



01149 25

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**DIVISIÓN DE POSGRADO FACULTAD DE  
INGENIERÍA**

" MODELACIÓN REOLÓGICA DEL FLUIDO ESPUMADO  
DE PERFORACIÓN (BPU) USADO DURANTE LA  
PERFORACIÓN DE YACIMIENTOS DEPRESIONADOS EN  
LA REGIÓN SUR "

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
PRESENTA:

**ANGÉLICA MARÍA RIOS ÁLVAREZ**

ASESOR DE TESIS:  
Dr. **VICENTE CASARIEGO GONZALEZ**

JUNIO 2003.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

RIOS ALVAREZ ANGELICA

A



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.

**CONTENIDO.**

<b>CONTENIDO</b>	<b>Página</b>
<b>RESUMEN.</b>	
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	
<i>Objetivo.</i>	
<i>Justificación.</i>	
<b>Capítulo 1. <u>MARCO TEÓRICO.</u></b>	
1.1. <i>Tipos de técnicas de perforación de pozos.</i>	1
1.2. <i>Perforación con espumas.</i>	3
1.2.1. <i>Calidad de espuma.</i>	7
1.2.2. <i>Química básica de la espuma.</i>	8
1.2.2.1. <i>Estructura de la espuma.</i>	8
1.2.2.2. <i>Dinámica de la espuma.</i>	9
1.2.3. <i>Reología e hidráulica de la espuma.</i>	11
1.2.3.1. <i>Propiedades variables del fluido.</i>	12
1.2.3.2. <i>Variables del medio de perforación.</i>	14
1.2.3.3. <i>Variables controlables.</i>	16
1.2.3.4. <i>Modelos Reológicos.</i>	18
1.2.3.5. <i>Ecuaciones de flujo para espumas.</i>	21

1.2.4. Aditivos para espumas.	27
1.2.4.1. Requerimientos de propiedades del fluido.	27
1.2.4.2. Aditivos químicos.	28
1.2.5. Mezcla de aditivos.	35
1.2.6. Equipo para perforar con espuma.	37
1.2.7. Métodos y Procedimientos para el reciclado de espuma.	39
1.2.7.1. Sistema de recirculación mecánico.	39
1.2.7.2. Sistema de recirculación química.	40

**Capítulo 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.**

2.1. Descripción del fluido espumado BPU.	43
2.2. Metodología.	44
2.2.1. Relación Causa-Consecuencia.	44
2.2.2. Mediciones Reológicas.	48
2.2.2.1. Medición de la Viscosidad.	49
2.2.2.2. Medición del Esfuerzo de Cedencia.	57
2.2.3. Estabilidad de Espumas.	60
2.2.4. Procedimientos Experimentales Propuestos.	63
2.2.4.1. Determinación del Modelo Reológico en el Laboratorio de Fluidos de Perforación.	64
2.2.4.2. Comprobación del Modelo Reológico.	76



**Capítulo 3. INTERPRETACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.**

3.1. <i>Viscosímetro Capilar.</i> .....	82
3.2. <i>Viscosímetro con Geometría Couette o de discos.</i> .....	83
3.3. <i>Viscosímetro de Cono y Plato.</i> .....	88
3.4. <i>Descripción del procedimiento de Interpretación de datos usados para el fluido BPU.</i> .....	90

**Capítulo 4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.**

4.1. <i>Resultados.</i> .....	145
4.2. <i>Discusión.</i> .....	160
4.3. <i>Conclusiones.</i> .....	162

**BIBLIOGRAFÍA**

**ANEXO A**

**ANEXO B**

## LISTA DE TABLAS.

<b>CAPÍTULO I</b>		<b>Página</b>
		17
TABLA No. 1.	EFFECTO DEL INCREMENTO DE ALGUNAS VARIABLES DE LA ESPUMA.	
TABLA No. 2.	VISCOSIDAD PLÁSTICA Y PUNTO DE CEDENCIA DE ESPUMAS (KRUG, 1971).	20
TABLA No. 3.	PROPIEDADES DE FLUJO PARA ESPUMAS (OKPOBIRI & IKOKU, 1986).	21
TABLA No. 4.	COEFICIENTES EN LA ECUACIÓN DE ESTADO PARA ESPUMAS.	25
TABLA No. 5.	POLÍMEROS COMÚNES.	33
TABLA No. 6.	RANGO DE CONCENTRACIONES COMUNES.	34
<b>CAPÍTULO III</b>		<b>Página</b>
TABLA No. 1.	FACTORES DE CONVERSIÓN PARA LAS PALETAS DEL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD R.V.T. (BAJO CONDICIONES DE MEDICIÓN ESTÁNDAR).	90
TABLA No. 2.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 55%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.0 %.	93
TABLA No. 3.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 60%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.0 %.	95
TABLA No. 4.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 70%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.0 %.	97
TABLA No. 5.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 80%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.0 %.	99

		Página
TABLA No. 6.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 90%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.0 %.	101
TABLA No. 7.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 95%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.0 %.	103
TABLA No. 8.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 55%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.5 %.	105
TABLA No. 9.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 60%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.5 %.	107
TABLA No. 10.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 70%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.5 %.	109
TABLA No. 11.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 80%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.5 %.	111
TABLA No. 12.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 90%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.5 %.	113
TABLA No. 13.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 95%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 1.5 %.	115

---

TABLA No. 14.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 55%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 2.0 %.	117
TABLA No. 15.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 60%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 2.0 %.	119
TABLA No. 16.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 70%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 2.0 %.	121
TABLA No. 17.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 80%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 2.0 %.	123
TABLA No. 18.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 90%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 2.0 %.	125
TABLA NO. 19.	EJEMPLIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS NECESARIOS PARA TRANSPORTAR LAS LECTURAS OBTENIDAS EN EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD MODELO RVT A FUNCIÓN DE VISCOSIDAD DE ESPUMA DE CALIDAD 95%, PARA UN FLUIDO TIPO "A" Y CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE ( $C_{\text{ESPUMANTE}}$ ) DE 2.0 %.	127



## CAPÍTULO IV

Página

---

TABLA No. 1.	ECUACIONES DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLIMERO VISCOSIFICANTE.	139
TABLA No. 2.	RANGOS DE VALORES DE LOS ÍNDICES DE CONSISTENCIA Y COMPORTAMIENTO DE FLUJO, PARA ECUACIONES DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD.	142
TABLA No. 3.	ECUACIONES DE VISCOSIDAD DE ESPUMA EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLIMERO VISCOSIFICANTE.	145
TABLA No. 4.	RANGOS DE VALORES PARA EL COEFICIENTE Y EL EXPONENTE PARA ECUACIONES DE VISCOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORTE.	148
TABLA No. 5.	COMPARACIÓN DE VALORES OBTENIDOS CON LOS REPORTADOS POR MITCHELL.	151
TABLA No. 6.	TIEMPO DE VIDA MEDIA DEL FLUIDO ESPUMADO BPU EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AGENTE ESPUMANTE (TIPO DE FLUIDO "A").	152
TABLA No. 7.	TIEMPO DE VIDA MEDIA DEL FLUIDO ESPUMADO BPU EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AGENTE ESPUMANTE (TIPO DE FLUIDO "B").	153

## LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I.	Página
FIG. 1.2.1. TIPOS DE FLUIDOS BAJOBALANCE DE ACUERDO AL RÉGIMEN DE FLUJO (LORENZ, 1980).	3
FIG. 1.2.2. FASE CONTÍNUA.	6
FIG. 1.2.2.1.1. CONTACTO DE LA ESPUMA POLIEDRAL	9
FIG. 1.2.2.1. REDISTRIBUCIÓN DE LA PRESIÓN DE BURBUJA.	10
FIG. 1.2.3.1.1. VISCOSIDAD DE LOS FLUIDOS DE FASE VARIABLE vs. FRACCIÓN DE VOLUMEN DE LÍQUIDO (LVF).	13
FIG. 1.2.3.1.2. EFECTO DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO SOBRE EL RITMO DE PERFORACIÓN.	14
FIG. 1.2.3.2.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA VISCOSIDAD DEL FLUIDO.	15
FIG. 1.2.3.2.2. PRESIÓN DE FONDO vs. GASTO DE INYECCIÓN DE GAS.	15
FIG. 1.2.3.2.3. PRESIÓN DE INYECCIÓN vs. GASTO DE GAS A VARIOS GASTOS DE LÍQUIDO.	16
FIG. 1.2.3.5.1. FLUJO A TRAVÉS DE LA TOBERA DE UNA BARRENA (OKPOBIRI & IKOKU, 1986).	26
FIG. 1.2.4.2.1. CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE VS. VIDA MEDIA DE LA ESPUMA (ROBERTSON, 1992).	28
FIG. 1.2.4.2.2. CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE VS. TEMPERATURA (ROBERTSON, 1992 Y ROVIG, 1992).	31
FIG. 1.2.5.1. ENSAMBLE DE PERFORACIÓN CON ESPUMA -USANDO AIRE- (SCOTT ET AL., 1995).	36
FIG. 1.2.6.1. INSTALACIÓN DEL EQUIPO NECESARIO PARA PERFORAR CON ESPUMA (HOOKE ET AL., 1977).	37
FIG. 1.2.6.2. SISTEMA DE MEZCLADO DE ESPUMA (CARDEN, 1995).	38
FIG. 1.2.7.1.1. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN MECÁNICA DE ESPUMA (HANKING ET AL., 1996).	40
FIG. 1.2.7.2.1. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN QUÍMICA DE ESPUMA (CLEARWATER, 1994).	41

<b>CAPÍTULO II.</b>		<b>Página</b>
FIG. 2.2.1.1.	MATRIZ DE VESTER.	47
FIG. 2.2.2.1.	FLUJO DE ESPUMA EN UN CAPILAR.	55
FIG. 2.2.2.2.1.	DISPOSITIVO DE PALETA PARA MEDIR EL ESFUERZO DE CEDENCIA.	58
FIG. 2.2.2.2.2.	DEFLEXIÓN ANGULAR VS. TIEMPO PARA UNA EMULSIÓN MEDIDA USANDO UNA GEOMETRÍA DE PALETAS.	58
FIG. 2.2.3.1.	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL APARATO PARA MEDIR ESPUMAS ESTÁTICAS.	62
<b>CAPÍTULO III.</b>		<b>Página</b>
FIG. 3.2.1.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE ROTACIÓN $N_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE $n$ .	86
FIG. 3.2.2.	PSEUDO-CONSTANTE DE METZNER-OTTO, para una paleta de disco 1 de un viscosímetro BROOKFIELD modelo RVT, en función del valor del índice de comportamiento de flujo $n$ , para un fluido complejo como es la ESPUMA.	87
FIG. 3.2.3.	GRÁFICA DE ESFUERZO DE CORTE $\tau_i$ vs. VELOCIDAD DE CORTE, $\dot{\gamma}_i$ QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO.	88
FIG. 3.2.4.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE LA ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL CASO DE UNA ESPUMA CALIDAD 55%.	89
FIG. 3.2.5.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%.	89
FIG. 3.4.1.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	93
FIG. 3.4.2.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	94
FIG. 3.4.3.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	94

		Página
FIG. 3.4.4.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	95
FIG. 3.4.5.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	96
FIG. 3.4.6.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	96
FIG. 3.4.7.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	97
FIG. 3.4.8.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	98
FIG. 3.4.9.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	98
FIG. 3.4.10.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	99
FIG. 3.4.11.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	100
FIG. 3.4.12.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	100
FIG. 3.4.13.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	101
FIG. 3.4.14.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	102

		Página
FIG. 3.4.15.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	102
FIG. 3.4.16.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	103
FIG. 3.4.17.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	104
FIG. 3.4.18.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	104
FIG. 3.4.19.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	105
FIG. 3.4.20.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	106
FIG. 3.4.21.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	106
FIG. 3.4.22.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	107
FIG. 3.4.23.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	108
FIG. 3.4.24.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	108
FIG. 3.4.25.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	109

		Página
FIG. 3.4.26.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	110
FIG. 3.4.27.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	110
FIG. 3.4.28.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	111
FIG. 3.4.29.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	112
FIG. 3.4.30.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	112
FIG. 3.4.31.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	113
FIG. 3.4.32.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	114
FIG. 3.4.33.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	114
FIG. 3.4.34.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	115
FIG. 3.4.35.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	116
FIG. 3.4.36.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	116
FIG. 3.4.37.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	117

		Página
FIG. 3.4.38.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	118
FIG. 3.4.39.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	118
FIG. 3.4.40.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	119
FIG. 3.4.41.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	120
FIG. 3.4.42.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	120
FIG. 3.4.43.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	121
FIG. 3.4.44.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	122
FIG. 3.4.45.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	122
FIG. 3.4.46.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	123
FIG. 3.4.47.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	124
FIG. 3.4.49.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	124
FIG. 3.4.49.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	125

		Página
FIG. 3.4.50.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	126
FIG. 3.4.51.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	126
FIG. 3.4.52.	GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	127
FIG. 3.4.53.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	128
FIG. 3.4.54.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	128
FIG. 3.4.55.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	129
FIG. 3.4.56.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	129
FIG. 3.4.57.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	130
FIG. 3.4.58.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	130
FIG. 3.4.59.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	131
FIG. 3.4.60.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	131
FIG. 3.4.61.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$	132



		Página
FIG. 3.4.62.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.0\%$	132
FIG. 3.4.63.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.0\%$	133
FIG. 3.4.64.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.0\%$	133
FIG. 3.4.65.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.0\%$	134
FIG. 3.4.66.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.0\%$	134
FIG. 3.4.67.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$	135
FIG. 3.4.68.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$	135
FIG. 3.4.69.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$	136
FIG. 3.4.70.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$	136
FIG. 3.4.71.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$	137
FIG. 3.4.72.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma\dot{\epsilon}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$	137



FIG. 3.4.73.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	138
FIG. 3.4.74.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	138
FIG. 3.4.75.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	139
FIG. 3.4.76.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	139
FIG. 3.4.77.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	140
FIG. 3.4.78.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$	140
FIG. 3.4.79.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	141
FIG. 3.4.80.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	141
FIG. 3.4.81.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	142
FIG. 3.4.82.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	142
FIG. 3.4.83.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	143

		Página
FIG. 3.4.84.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	143
FIG. 3.4.85.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	144
FIG. 3.4.86.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	144
FIG. 3.4.87.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	145
FIG. 3.4.88.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	145
FIG. 3.4.89.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	146
FIG. 3.4.90.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B", $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$	146

FIG. 4.4.1.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_l$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_l$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 55% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	139
FIG. 4.4.2.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_l$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_l$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 60% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	140
FIG. 4.4.3.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_l$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_l$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 70% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	140
FIG. 4.4.4.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_l$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_l$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 80% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	141
FIG. 4.4.5.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_l$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_l$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 90% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	141
FIG. 4.4.6.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\dot{\gamma}_l$ vs. ESFUERZO DE CORTE, $\tau_l$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 95% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO	142
FIG. 4.4.7.	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%.	143
FIG. 4.4.8.	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%.	143
FIG. 4.4.9.	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%.	143
FIG. 4.4.10.	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%	144
FIG. 4.4.11.	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%	144

		Página
FIG. 4.4.12.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CON CALIDAD 60% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	145
FIG. 4.4.13.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CON CALIDAD 70% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	146
FIG. 4.4.14.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CON CALIDAD 80% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	146
FIG. 4.4.15.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CON CALIDAD 90% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	147
FIG. 4.4.16.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CON CALIDAD 95% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	147
FIG. 4.4.17.	GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE $\gamma_i$ vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA, $\eta_i$ QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES CALIDADES DE ESPUMA, DESPRECIANDO EL EFECTO DE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.	148
FIG. 4.4.18.	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LA ESPUMA OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%	149
FIG. 4.4.19.	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LA ESPUMA OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%	149
FIG. 4.4.20.	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LA ESPUMA OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%	149
FIG. 4.4.21.	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LA ESPUMA OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%	150

---

FIG. 4.4.22.	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LA ESPUMA OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%	150
--------------	---	-----

## NOMENCLATURA

<i>Símbolo</i>	<i>Variable</i>	<i>Unidades</i>
a, b, c, c'	Coefficientes que se definen en la tabla No. 4.	
B'	Coefficiente modificado de Virial	Psia <sup>-1</sup>
C <sub>esp</sub>	Concentración de espumante	%
D	Diámetro interior de la tubería de perforación.	In
d	Diámetro interior del capilar	ft
D <sub>h</sub>	Diámetro del agujero descubierto	In
D <sub>p</sub>	Diámetro exterior de la tubería de perforación	In
D <sub>p</sub>	Diámetro del plato	Ft
f	Factor de fricción	Adimensional
F <sub>pr</sub> , F <sub>A</sub>	Expresiones definidas en el anexo A.	
g	Aceleración debida a la gravedad.	Ft/seg <sup>2</sup>
G'	Módulo Elástico	Adimensional
g <sub>c</sub>	Constante gravitacional	32.2 $\frac{ft - lb_m}{lb_f - seg^2}$
H	Longitud del bob	Ft
K	Relación de radios del bob contra la camisa.	Adimensional
k'	Índice de consistencia de flujo	$\frac{lb_f seg^n}{ft^2}$
K <sub>Ny</sub>	Pseudo constante de Metzner	seg <sup>-1</sup> /rpm
k <sub>r</sub>	Constante del resorte	Lb-ft/grados
K <sub>ut</sub>	Constante de la paleta de disco del viscosímetro Brookfield	Pa/°
L	Longitud efectiva del capilar	Ft
MD	Profundidad desarrollada	Ft
M <sub>g</sub>	Peso molecular del gas	$\frac{lb_m}{lb - mol}$

<i><b>Símbolo</b></i>	<i><b>Variable</b></i>	<i><b>Unidades</b></i>
N*	Índice de flujo aparente	Adimensional
N'	Índice de comportamiento de flujo	Adimensional
N <sub>c</sub>	Velocidad rotacional del cono	Seg <sup>-1</sup>
N <sub>i</sub>	Velocidad de rotación de la paleta de disco	Rpm
P	Presión absoluta	Psia
P <sub>1</sub>	Presión corriente arriba de la tobera	Psia
P <sub>2</sub>	Presión de fondo	Psia
P <sub>e</sub>	Exceso de presión	Psia
Q	Ritmo de flujo volumétrico	Ft <sup>3</sup> /seg
R	Constante del gas	
r	Radio de la burbuja	Ft
R <sub>b</sub>	Radio del bob	Cm
R <sub>c</sub>	Radio de la camisa	Cm
r <sub>p</sub>	Radio del palto	Ft
R <sub>v</sub>	Radio de la paleta	Ft
S	Tensión superficial	Lb <sub>f</sub> /ft
T	Temperatura absoluta	°R
T	Torque	Lb <sub>f</sub> -ft
u	Velocidad promedio de la espuma	ft/seg
U <sub>n</sub>	Velocidad en la tobera	Ft/seg
v	Volumen específico de la espuma	Ft <sup>3</sup>
V	Velocidad promedio del fluido.	Ft/seg
VD	Profundidad vertical	Ft
V <sub>g</sub>	Volumen específico del gas	Lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup>
Y <sub>p</sub>	Punto de cedencia del fluido base líquido.	Lb/100 ft <sup>2</sup>
Z	Factor de compresibilidad del gas	Adimensional
Δp	Caída de presión debida a la fricción laminar.	Lb <sub>f</sub> /ft <sup>2</sup>
Γ	Calidad de la espuma	Fracción
Ω <sub>r</sub>	Velocidad de flujo angular	Rad/seg





<i>Símbolo</i>	<i>Variable</i>	<i>Unidades</i>
$\alpha_1$	Lectura en el torque del dial del viscosímetro	Grados ( $^{\circ}$ )
$\phi$	Ángulo entre el plato y el cono	grados
$\gamma_c$	Deformación crítica de la burbuja	Lb <sub>r</sub> /ft <sup>2</sup>
$\gamma_w$	Velocidad de corte en la pared	seg <sup>-1</sup>
$\eta_r$	Viscosidad de la espuma	$\frac{lb}{ft - seg}$
$\mu$	Viscosidad de la base líquida	$\frac{lb}{ft - seg}$
$\mu_p$	Viscosidad plástica del fluido base líquido.	Cp
$\theta$	Deflexión del resorte siendo una medida del torque en el plato.	grados
$\tau_o$	Esfuerzo de cedencia	lb <sub>r</sub> /ft <sup>2</sup>
$\tau_w$	Esfuerzo de corte en la pared	Lb <sub>r</sub> /ft <sup>2</sup>
$\tau_1$	Esfuerzo de corte	Pa

## RESUMEN.

El trabajo que a continuación se presenta trata de una investigación teórico-experimental realizada en las instalaciones del Laboratorio de Fluidos de Perforación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, sobre una metodología de la interpretación de datos reológicos de fluidos complejos, tales como la espuma con viscosímetros de geometrías comunes. Es así que se propone un procedimiento experimental y de interpretación de datos que permite usar viscosímetros rotacionales con geometría comunes en la industria petrolera para medir la reología de la espuma y transportar las lecturas obtenidas a funciones de viscosidad de espuma corregida por resbalamiento. Este procedimiento es la conjunción del método de Mitschka para transformar lecturas de un viscosímetro Brookfield a funciones de viscosidad, y de la metodología de Yoshimura que corrige la velocidad de corte por el resbalamiento, haciendo uso de dos geometrías de medición.

Se presentan las gráficas de esfuerzo de corte y viscosidad de espuma comparadas con las reportadas por Mitchell, quien usó un viscosímetro capilar. Las tendencias que se han logrado reproducir son del orden de las reportadas por autores anteriores, esto da un indicio de que el método propuesto para la toma de la reología puede ser aceptable, considerando que en los laboratorios de fluidos de perforación, difícilmente podemos encontrar un viscosímetro capilar.

En cuanto a la estabilidad de la espuma, se encontró que el punto de concentración de espumante al cual la vida media comienza a disminuir, ocurre a concentraciones de espumante que no se usan en operaciones comunes de perforación con fluidos espumados.

## **INTRODUCCIÓN.**

La perforación de yacimientos depresionados, es ahora uno de los principales retos a los que se enfrenta la industria petrolera, debido a estas condiciones se tienen problemas de pérdida total de circulación que no se había logrado resolver, aún con el uso de fluidos base aceite de baja densidad y de los sistemas de bloqueo, en los cuales se ha invertido grandes cantidades de tiempo y dinero. El hecho de tener pérdida de circulación total, involucra el incremento del costo del pozo por el consumo excesivo de fluido de control, tiempo de operación, logística, renta de equipos especiales, barrenas, entre otros; además de la disminución de la producción debida al daño causado en la vecindad del pozo.

No obstante, un grupo de compañeros a cargo del Sr. Bonifacio Pong Uzcanga desarrollaron la formulación de un fluido de perforación espumado que cumple con las condiciones operativas que requiere la perforación de yacimientos depresionados de la Región Sur. Mismo que ha tenido éxito en su uso, más sin embargo carece de una caracterización reológica completa.

Es así que el Objetivo de este trabajo es caracterizar reológicamente tal fluido espumado -BPU- con el propósito de complementar el trabajo ya desarrollado en el campo. El trabajo que a continuación se presenta consiste de una investigación sobre los procedimientos de caracterización reológica que se han realizado a la fecha, proponiendo un procedimiento de laboratorio para medir la reología de una espuma con viscosímetros comunes, así como la interpretación de estos datos para transportarlos a funciones de viscosidad de espuma.

Comparativamente con los resultados reportados por investigadores que han usado viscosímetros capilares, los valores aquí obtenidos arrojaron un comportamiento parecido

cualitativa y cuantitativamente, los porcentajes de error varían entre 0 a 20%. Este procedimiento es una alternativa para trabajar con espumas, aún cuando no se dispone de un equipo más sofisticado como lo es un viscosímetro capilar, cuyo uso no es nada común en un laboratorio de fluidos de perforación.

La teoría sobre espumas ha establecido que la única forma de conocer la viscosidad de las espumas es por medio de un viscosímetro capilar, sin embargo existen autores que han trabajado con fluidos no-newtonianos tan complejos como son las espumas y han desarrollado una metodología para ello, es el caso de Yoshimura y Mitschka, es en ellos en los cuales se ha basado la interpretación de los datos experimentales, proporcionando una metodología práctica para trabajar con espumas y que se acerca a lo establecido en la teoría de espumas.

Cabe aclarar que esta modelación se ha realizado únicamente a nivel de laboratorio, quedando como propuesta para trabajos subsiguientes comprobarlo en un sistema de circulación a escala o de tamaño real, es así que se propone en el capítulo 2, la metodología a seguir para ambos casos.

# CAPÍTULO I

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se hace una introducción sobre perforación bajobalance, mencionando diferentes técnicas disponibles, sin embargo el objeto de este capítulo es describir y tratar de comprender el comportamiento de un fluido espumado que precisamente responde a una de las técnicas de perforación bajobalance. Por tal razón se desarrollará ampliamente sólo una de estas técnicas: Perforación con espuma.

### **1.1. TIPOS DE TÉCNICAS DE PERFORACIÓN DE POZOS.**

---

La mayoría de los pozos de aceite y gas natural son perforados usando la técnica rotatoria, en la cual una barrena disgrega la roca en la base del pozo. Un fluido de perforación se bombea al fondo del agujero y entonces regresa a la superficie. El fluido es bombeado corriente a bajo a través de la sarta de perforación y regresa a la superficie a través del espacio anular que existe entre la sarta de perforación y la pared del agujero. Mientras fluye por el espacio anular, los recortes de roca se incorporan al fluido de perforación y éste los remueve hacia la superficie.

En operaciones de perforación convencional, el fluido de perforación tiene varias funciones, entre las cuales se puede mencionar la estabilización del agujero, enfriar y lubricar la barrena, controlar la entrada de fluidos de la formación hacia el pozo, siendo esta última la más importante de todas las funciones. Se dice que el pozo se encuentra EN BALANCE si la presión hidrostática en el agujero es igual a la presión de formación. En esta situación, no hay flujo neto de fluido hacia dentro o hacia fuera del agujero.

La composición y propiedades del fluido de perforación son por lo regular tales que aseguran que la presión del fluido en el pozo excede la presión de poro en las formaciones penetradas por la barrena. En esta situación de SOBREALANCE, la presión del fluido de perforación evita que los fluidos de la formación fluyan hacia dentro del pozo durante la perforación. Existe algún flujo de fluidos del pozo hacia la formación que se encuentra alrededor del agujero. Por tal motivo, al fluido de perforación se le adiciona cierto tipo de materiales para restringir dicho flujo, mediante la depositación de un enjarre de baja permeabilidad sobre la pared del agujero, en los poros y fracturas adyacentes al pozo.

En operaciones de perforación BAJOBALANCE, la presión del fluido de perforación es intencionalmente mantenida por debajo de la presión de poro, en la sección de agujero descubierto. Como resultado, los fluidos de la formación fluyen hacia el pozo cuando la formación que se penetra es permeable. Por esta razón, la perforación Bajobalance es algunas veces referida como "Perforación Fluyendo".

El término "PSEUDO-BAJOBALANCE" ha sido usado para describir condiciones donde el pozo está siendo presuntamente perforado bajobalance, sin embargo, durante las operaciones de viaje, conexiones o terminaciones, la columna de presión excede la presión de formación. Para efecto de este trabajo, esta definición no será usada, ya que se considerará que la condición bajobalance fue mecánicamente o hidráulicamente violentada en operaciones de pseudo-bajobalance.

Un "lodo" bajobalanceado puede ser un lodo convencional, agua, aire, sistemas aireados (lodo aireado o espuma) o aire puro con o sin niebla. El "aire" o sistemas aireados pueden usar aire, gas natural, nitrógeno o una combinación de gases. En este trabajo, el término "gas" será usado para referirse a aire, gas natural, nitrógeno o cualquier otro gas, excepto donde se aclare.

Como una generalización, la perforación bajobalance es usada por tres razones básicas:

- Para mejorar el ritmo de perforación.
- Para limitar las pérdidas de circulación.
- Para proteger el yacimiento.

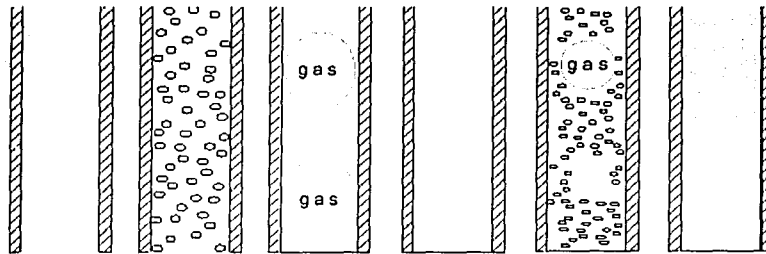
Cada uno de estos tres retos tiene numerosas subcategorías. No obstante, si la perforación bajobalance no reduce el costo de perforación o mejora la producción, esto es un valor marginal.

El último propósito, entonces, es reducir el costo de producción del yacimiento.

## 1.2. PERFORACIÓN CON ESPUMAS.

---

Las espumas pueden ser usadas como fluido de circulación durante la perforación, así como en operaciones de terminación y reparación de pozos. La perforación con espumas llegó a ser popular a finales de 1960 y a principios de 1970. La espuma fue empleada para manejar grandes entradas de líquidos de formación, tales como agua o aceite que no podían ser manejados con aire, gas o niebla. La espuma levanta los recortes del fondo del pozo mejor que otros fluidos de perforación. Las espumas consisten de una fase líquida continua, formando una estructura celular que rodea y atrapa cierto volumen de gas. Es un fluido que se encuentra entre niebla y fluidos aireados con un espectro de fluido multifásico, como se muestra en la figura 1.2.1.



**FIG. 1.2.1. TIPOS DE FLUIDOS BAJOBALANCE DE ACUERDO AL RÉGIMEN DE FLUJO (LORENZ, 1980).**



La fase líquida de un fluido espuma contiene algún tipo de surfactante o agente espumante. Los surfactantes ayudan a "encapsular" el sistema gas-líquido, previniendo que la fase gaseosa se separe de la fase líquida. El uso de un agente espumante es la característica más distintiva que caracteriza a las espumas de otros fluidos aireados. Las espumas pueden tener viscosidades altamente extremas; en todo momento sus viscosidades son mayores que la de la fase líquida y el gas que contienen. Al mismo tiempo, sus densidades son usualmente menores a la mitad de la densidad del agua.

Con esta combinación de alta viscosidad y baja densidad, los fluidos de perforación espumados pueden proveer de varios beneficios para las operaciones de perforación.

- La viscosidad alta permite un transporte de recortes eficiente, a velocidades anulares que son mucho menor que las requeridas para perforación con aire o niebla. Los gastos de inyección de gas durante la perforación con espuma puede ser mucho menor que los requeridos para perforación con gas seco o niebla.
- La baja densidad del fluido permite establecer condiciones de bajobalance en casi cualquier circunstancia. La presión de fondo con la espuma tiende a ser mayor que la que se tiene con gas seco o niebla. Esto puede reducir los ritmos de penetración por debajo de los que se tienen con gas seco. Sin embargo, los ritmos de penetración con espumas son aún considerablemente mayores a los que se pueden alcanzar en la perforación con lodo convencional.
- La mayor presión anular con espuma puede reducir potencialmente la inestabilidad mecánica del pozo en comparación con el uso de gas seco o niebla. Al mismo tiempo, las bajas velocidades anulares típicas en la perforación con espuma, reducen grandemente la posibilidad de erosión de las paredes del agujero o de la sarta de perforación.

Probablemente el mayor beneficio de las espumas como un fluido de perforación bajobalance, así como la principal razón para su uso es su habilidad de levantar grandes cantidades de líquidos producidos.

Durante la perforación con espuma, un surfactante en solución se mezcla con el flujo del gas y la mezcla se bombea a través de la sarta de perforación. La generación de espuma puede no completarse hasta que las fases de gas y líquido son mezcladas completamente cuando pasan a través de la barrena. En espumas estables pre-formadas, la espuma es intencionalmente formada en superficie mezclando el surfactante y el gas en un generador de espumas.

El término de perforación con espuma será usado en este trabajo para todas las operaciones en las cuales el fluido de circulación permanece como una espuma en cualquier punto dentro del sistema del pozo. Así las condiciones de circulación tienen que elegirse o controlarse de manera que nos aseguren que tendremos esta condición. Principalmente, la presión de circulación tiene que garantizar que la fracción de volumen de líquido permanecerá en un rango razonablemente definido dentro del pozo. En este sentido, las propiedades benéficas de la espuma, principalmente su viscosidad, pueden ser adecuadamente explotadas.

Las espumas pueden ser subdivididas en:

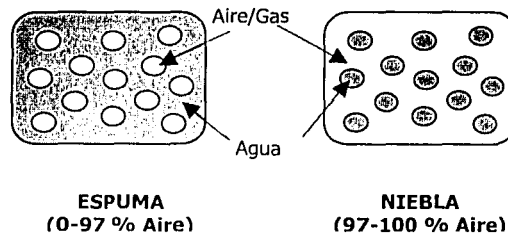
- Espuma estable.
- Espuma rígida.

La espuma estable es similar a una crema para afeitarse y es producida con un agente espumante al 1-2% en volumen adicionado a la fase líquida del fluido. Esto es aproximadamente 10 veces la cantidad del agente espumante usado para generar un sistema niebla.

La espuma rígida incorpora una cantidad ligeramente menor de agente espumante que la espuma estable –aproximadamente un 1%. Esta espuma puede incluir de 3 a 4% de bentonita o gel en la mezcla, así como una cantidad pequeña de un polímero viscosificante (menor al 0.2%).

El término "espuma" es comúnmente usado para describir un fluido de perforación que de hecho es una niebla construida con productos espumantes. Es importante distinguir entre espuma y niebla, ya que el comportamiento reológico e hidráulico de la espuma y la niebla son completamente diferentes.

La figura 1.2.2 muestra que la principal diferencia entre espuma y niebla es la fase continua. La espuma es más estrictamente definida como un fluido de dos fases que tiene como fase continua al líquido y una fase gaseosa suspendida en forma de burbujas. Mientras que la niebla, es un fluido de dos fases que tiene como fase continua al gas. La fase líquida se encuentra suspendida en pequeñas gotas en la fase gaseosa.



**FIG. 1.2.2. FASE CONTÍNUA (Underbalanced drilling and completion manual).**

Estos dos tipos de fluido se comportan muy diferente en cuanto a la reología, capacidad de acarreo, fricción, y presión hidrostática. E incluso, la descripción matemática de la hidráulica de los dos fluidos son diferentes. El punto preciso donde se cruzan estos patrones de flujo (el paso de niebla a espuma) ha sido tema de debate durante mucho tiempo. Se puede decir que el punto donde se cruzan está relacionado directamente a la calidad de la espuma.

### **1.2.1 CALIDAD DE ESPUMA.**

La calidad de espuma está definida como el porcentaje en volumen de un fluido de dos fases que es ocupado por la fase gaseosa. La calidad de espuma puede ser expresada como fracción decimal o como porcentaje equivalente. Por ejemplo, una espuma de calidad de 60 ó 0.60 describe un fluido de dos fases compuesto por el 60% en volumen de gas y 40% en volumen de líquido.

Varios investigadores han demostrado que la calidad de la espuma en el punto de cruce puede variar de 0.94 a 0.97. Un fluido de dos fases se comportará como una espuma cuando se tengan calidades de espuma por debajo de este rango, y se comportará como una niebla cuando la calidad de espuma sea mayor a este rango. El punto exacto donde la transición del fluido de espuma a niebla o viceversa, depende de las propiedades físicas del gas y líquido específicos que comprenden la mezcla de la espuma.

La espuma, como cualquier fluido multifásico, es compresible. A medida que la presión ejercida sobre el fluido espumado incrementa, la calidad de la espuma disminuirá. El incremento de presión provoca que el volumen de la fase gaseosa disminuya mientras que el volumen de la fase líquida permanece constante. La calidad de la espuma de un fluido en particular puede ser dramáticamente diferente en el fondo del pozo que a condiciones de superficie.

Las variaciones en la calidad de espuma conlleva cambios en el comportamiento reológico e hidráulico del fluido. Los fluidos espumados y aireados con calidades de espuma por encima de 0.55 presentan un comportamiento reológico similar. A calidades de espuma muy bajas (es decir, espumas en un ambiente de alta presión en el fondo del pozo), el fluido se comportará más como un líquido puro.

Estas diferencias reológicas e hidráulicas deben ser consideradas para cualquier intento de modelación de comportamiento de un fluido compresible.

## **1.2.2. QUÍMICA BÁSICA DE LA ESPUMA.**

Una de las primeras razones por las cuales la espuma no ha sido muy popular se debe al escaso conocimiento acerca del fluido y su comportamiento, a pesar de que no es necesario un entendimiento completo acerca de la química de las espumas, a continuación se presenta un conocimiento elemental que ayudará a asegurar una aplicación apropiada de ellas.

### **1.2.2.1. Estructura de la espuma.**

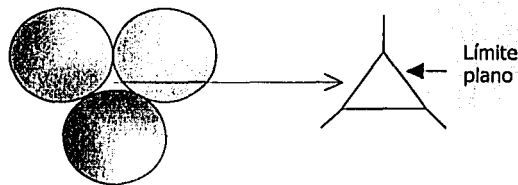
Como se mencionó anteriormente, la espuma se forma cuando el aire o algún otro gas se introduce bajo la superficie de un líquido que se expande y encierra el gas con una película de líquido. Todas las teorías sobre la formación y estabilidad de espumas requieren que un segundo material, además del líquido que se ha espumado, esté presente en el sistema. Esta sustancia es usualmente un soluto de superficie activa (surfactante), sin embargo puede también ser otro líquido. Esta es la primera diferencia entre la generación de una espuma y la simple aireación de un fluido.

Las espumas pueden ser clasificadas de acuerdo a su morfología, es decir, a su forma. Las espumas generalmente se dividen en dos grupos:

- Espuma esférica, la cual consiste de burbujas esféricas separadas por líquido.
- Espuma poliedral, que consiste de burbujas con forma poliedral con películas planas delgadas que contienen un pequeño volumen de líquido. Las espumas poliedrales son típicamente referidas como la verdadera espuma.

En una espuma real, cuando tres burbujas de igual tamaño llegan a estar juntas, forman tres ángulos de  $120^\circ$  en sus puntos de contacto (Ver figura 1.2.2.1.1). Estas películas tienden a perder su curvatura y llegan a ser planas, formando un borde altiplano entre los bordes individuales.

Una espuma ideal, consiste de burbujas de tamaño uniforme, forma una estructura pentagonal dodec-edral que comprime doce pentágonos equiláteros. Sin embargo, en la práctica, la espuma no tiene un comportamiento ideal, y contiene burbujas de diferentes volúmenes y tamaños.



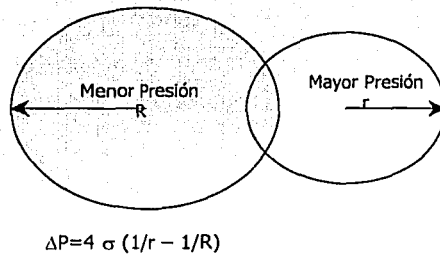
**FIG. 1.2.2.1.1. CONTACTO DE LA ESPUMA POLIEDRAL. (Underbalanced drilling and completion manual).**

### **1.2.2.2. Dinámica de la Espuma.**

Las espumas son inherentemente sistemas inestables constantemente sujetos a tres factores de rompimiento:

1. Redistribución del tamaño de la burbuja.
2. Adelgazamiento de las paredes de la burbuja.
3. Ruptura de la película de las paredes.

**Redistribución del tamaño de la burbuja.**- Ocurre porque la presión interna depende de la curvatura de las paredes de la burbuja. Cuando una burbuja grande y otra pequeña se adhieren, la burbuja pequeña siempre penetra la pared de la burbuja grande. Un exhaustivo trabajo de LaPlace y Plateau demostró que el radio de curvatura más pequeño, tiene la presión más alta dentro de la burbuja. Debido a que la burbuja más pequeña tiene un radio de curvatura menor, ésta tiene la mayor presión interna. Esto se muestra en la figura 1.2.2.2.1.



**FIG. 1.2.2.1. REDISTRIBUCIÓN DE LA PRESIÓN DE BURBUJA (Underbalanced drilling and completion manual).**

Estas dos burbujas podrían permanecer en su estado individual si no tuvieran una película permeable común por la fase interna de gas. El gas eventualmente se difunde de la burbuja más pequeña (mayor presión interna) a la burbuja más grande (menor presión interna). Esta movilidad causa que la burbuja pequeña llegue a ser aún más pequeña, mientras que las burbujas grandes incrementan su tamaño. Esta migración produce burbujas con grandes volúmenes de gas los cuales son fácilmente rotos.

**El adelgazamiento de las paredes de las burbujas.**- es una consecuencia del drene y la evaporación. El fluido drenado puede ser medido fácilmente por la generación de la espuma en un cilindro y registrando el volumen de líquido que se colecta en el fondo como una función del tiempo. Esto define la vida media de la espuma.

Este tipo de drene es debido a la gravedad; sin embargo, las espumas pueden drenarse aún si las fuerzas gravitacionales no estuvieran presentes. La figura 1.2.2.1.1 también muestra que los puntos de intersección de dos burbujas, donde existe una pared común entre dos burbujas, son planos. La curvatura es la misma en ambos lados de la pared y, de ahí que, la presión en el líquido que forma la pared es la misma a la presión de la burbuja.

En la interfase aire-líquido, la película es cóncava hacia la fase de aire. Esto causa que el líquido se encuentre a una presión capilar negativa la cual lo empuja desde el interior de la pared hacia las intersecciones, las cuales son conocidas como "bordes altiplanos". Este drene causa que las paredes se adelgacen hasta romperse formando una burbuja más grande.

**Ruptura de la película de las paredes.**- La ruptura de la estructura de la burbuja es causada por una disminución del área superficial, la cual tiende a un cambio substancial en la superficie de la energía libre. Una burbuja de 1 cm de radio y un espesor de pared de 0.001 cm tiene un área superficial de 25 cm<sup>2</sup> aproximadamente. Si esta burbuja levanta una gota de líquido, la superficie posterior es aproximadamente de 0.2 cm<sup>2</sup>. La diferencia de energía entre la burbuja y la gota es tan grande que la película de la burbuja penetra con una fuerza substancial. La formación de la gota de líquido a partir de la burbuja ha sido registrada a velocidades que exceden los 30 ft/seg (20 millas/hora).

### **1.2.3 REOLOGÍA E HIDRÁULICA DE LA ESPUMA PARA PERFORAR.**

Las propiedades reológicas de cada espuma dependen de las viscosidades de la fase líquida y gaseosa, así como de la fracción de volumen de gas (calidad de espuma) o líquido (LVF). Cuando la fracción de volumen de gas en una espuma dada está entre 60 y 94%, la espuma se comporta como un fluido plástico de Bingham. En este rango de calidad de espuma, las presiones de flujo y los gastos son fácilmente calculados, aunque no son intuitivos.



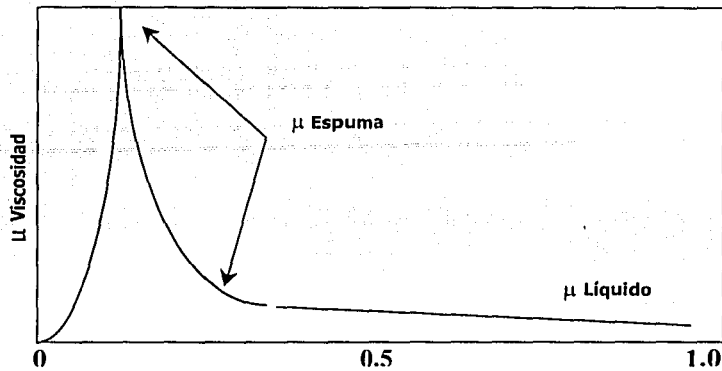
Los cálculos hidráulicos con espuma, así como con los fluidos convencionales, dependen de muy pocos parámetros asociados con cada fluido en particular. Si estos parámetros se conocen, o pueden ser estimados, los cálculos hidráulicos pueden realizarse. Una diferencia importante entre espuma (o cualquier otro fluido multifásico compresible) y un fluido convencional es que las propiedades de la espuma continuamente cambian dependiendo de la posición dentro del pozo. Las propiedades del fluido son también diferentes a la misma profundidad dependiendo si la espuma se encuentra dentro de la sarta de perforación o en el espacio anular.

Todas las propiedades del fluido son dependientes de las condiciones existentes en cada punto discreto dentro del sistema de circulación. Programas de cómputo sofisticados han sido desarrollados para determinar los gastos de flujo de gas y líquido óptimos, las presiones, los tiempos de circulación y las características de transporte de recortes de una espuma dada bajo cualquier tipo de condiciones.

#### **1.2.3.1. Propiedades variables del fluido.**

Las propiedades del fluido que deben ser determinadas incluyen la densidad y viscosidad. La densidad será en efecto un gradiente de densidad, el cual variará con la profundidad y la presión presente, o la presión de inyección o la presión de estrangulamiento en el espacio anular. Dependiendo del fluido y su viscosidad, un factor de fricción puede ser determinado. Este también se considerará en el análisis, y su efecto puede ser mayor o menor.

Debido a que se tiene una fase múltiple presente en la espuma y su naturaleza es compresible, al determinar la viscosidad no se tendrá un comportamiento lineal. La figura 1.2.3.1.1 muestra cómo la viscosidad varía de aire a niebla a espuma a líquido puro para un fluido base agua.

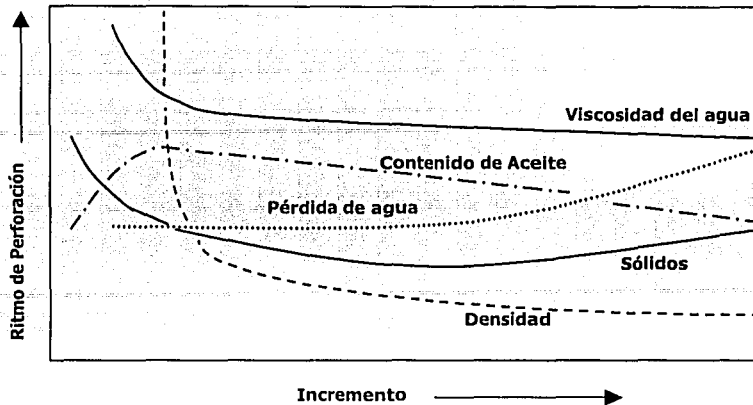


**FIG. 1.2.3.1.1. VISCOSIDAD DE LOS FLUIDOS DE FASE VARIABLE vs. FRACCIÓN DE VOLUMEN DE LÍQUIDO (LVF) (Underbalanced drilling and completion manual).**

Otra variable que afecta las propiedades de la espuma es el contenido de sólidos del fluido. Aunque la preparación original de una espuma estable no considera la presencia de sólidos, para el caso de la espuma rígida, se propone prepararla con un contenido de sólidos que varía del 3 al 5 % en volumen. El contenido de sólidos aumenta mientras el fluido se mueve dentro y asciende por el espacio anular durante las operaciones de perforación (recortes de perforación). Este hecho, modifica tanto la viscosidad como la densidad del fluido y el efecto debe ser considerado.

La presencia de contaminantes también afecta el comportamiento del fluido, lo cual sucede con las espumas. La presencia ya sea de aceite o salmuera puede causar el rompimiento de la espuma a menos que se haya considerado la contaminación y se haya adicionado un aditivo para contrarrestarla. Aún pequeñas cantidades de agua dulce puede romper una espuma por la disminución substancial de la calidad de espuma.

La figura 1.2.3.1.2 muestra la tendencia general de cambio de varios parámetros del fluido durante la perforación. La figura muestra que, al aumentar todos los parámetros (excepto la pérdida de circulación), el ritmo de perforación disminuye.



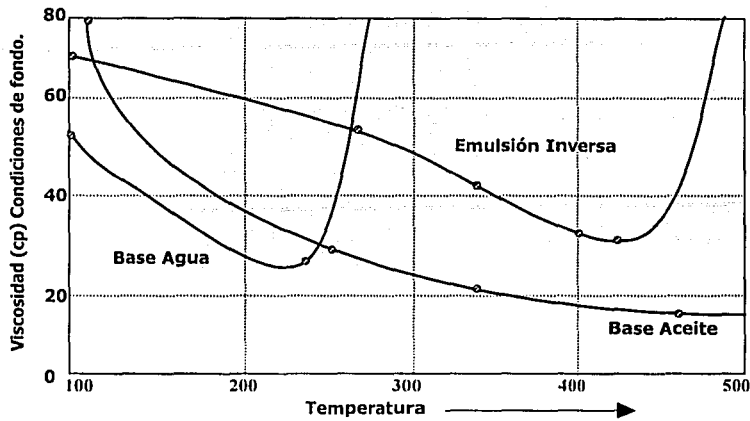
**FIG. 1.2.3.1.2. EFECTO DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO SOBRE EL RITMO DE PERFORACIÓN.**  
(*Underbalanced drilling and completion manual*).

Algunos de estos efectos cambian en tendencia opuesta a lo que se desea. Por ejemplo, al disminuir la viscosidad, el ritmo de perforación aumenta. Mientras más recortes se incorporen al espacio anular, la viscosidad aparente incrementará, lo cual disminuirá el ritmo de perforación. Cada cambio en las propiedades del fluido afecta el sistema completo y debe ser evaluado intencionalmente antes de hacer los cambios.

### **1.2.3.2. Variables del medio de perforación.**

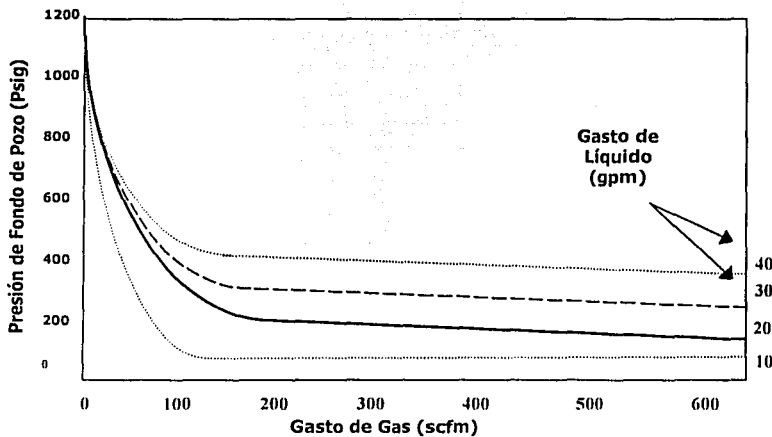
El medio de perforación que afecta, y que no puede ser controlable, también actúa para cambiar las propiedades del fluido. Los factores ambientales que más afectan cualquier sistema de espuma son la temperatura, la presión y los contaminantes.

La figura 1.2.3.2.1 muestra cómo la temperatura puede afectar la viscosidad de los tipos comunes de fluidos de perforación. Los efectos de presión sobre la espuma no son intuitivos tampoco.



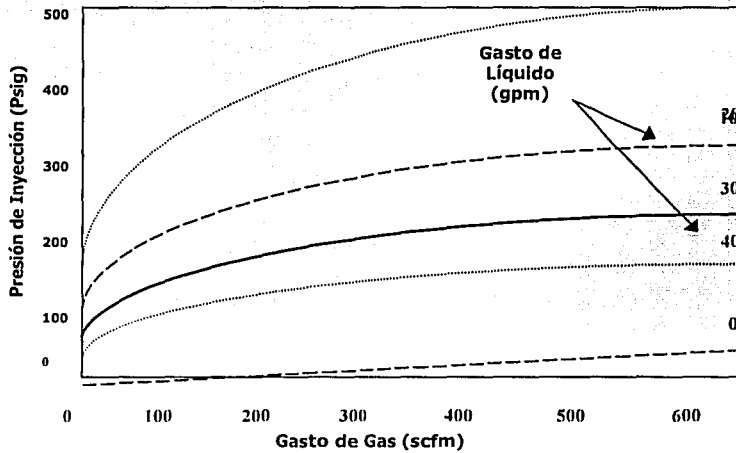
**FIG. 1.2.3.2.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA VISCOSIDAD DEL FLUIDO. (Underbalanced drilling and completion manual).**

La figura 1.2.3.2.2 muestra cómo la presión de fondo disminuye al aumentar la inyección de gas en un sistema bajobalanceado.



**FIG. 1.2.3.2.2. PRESIÓN DE FONDO vs. GASTO DE INYECCIÓN DE GAS (Underbalanced drilling and completion manual).**

También, la presión de fondo aumenta al aumentar el gasto de inyección del líquido o la fracción de volumen del líquido (LVF). La tendencia de estos efectos es uno de los que sí podrían estimarse intuitivamente. Lo mismo no podría decirse para la presión de inyección en superficie. La figura 1.2.3.2.3 muestra que la presión de inyección aumenta inicialmente con el incremento del gasto de inyección de líquido. Después del incremento inicial, sin embargo, la presión de inyección declina con la inyección de líquido adicional (o disminuye la calidad de la espuma).



**FIG. 1.2.3.2.3. PRESIÓN DE INYECCIÓN vs. GASTO DE GAS A VARIOS GASTOS DE LÍQUIDO.**  
*(Underbalanced drilling and completion manual).*

**1.2.3.3. Variables controlables.**

Una vez que el proceso de perforación comenzó, existen muy pocas variables que pueden ser ajustadas. La viscosidad de la fase líquida puede ser ajustada en parte, sin embargo de todas las variables controlables, es la que menos impacta en las condiciones de fondo

relativas a los cambios de presión y fricción. Los primeros factores controlables son el gasto de inyección de gas y líquidos y la presión de estrangulación en el anular.

El aumento del gasto de inyección de gas generalmente reduce la presión de fondo y aumenta la presión de inyección. Después de cierto punto, a pesar de que aumenta el gasto de gas, puede aumentar la presión de fondo debido a que la presión se mueve de un régimen dominado por la hidrostática a un régimen dominado por la fricción. La capacidad de acarreo de recortes es generalmente mejorada con altos gastos de inyección de gas, hasta que el límite de la calidad de espuma se alcanza y ocurre el régimen de flujo bache o niebla.

Tanto la presión de fondo como la presión de inyección generalmente aumentarán cuando el gasto de inyección de líquido o la presión de estrangulación aumenten. El efecto de estos cambios puede afectar la capacidad de limpieza del agujero. Los efectos de los parámetros controlables sobre la hidráulica de los fluidos espumados son resumidos en la tabla 1.

**TABLA No. 1. EFECTO DEL INCREMENTO DE ALGUNAS VARIABLES DE LA ESPUMA.**

Variable que aumenta	Efecto en la presión de inyección	Efecto en la presión de fondo	Efecto en la limpieza del agujero.
Gasto de gas	Aumenta	Disminuye	Mejora
Gasto de líquido	Disminuye	Aumenta	Mejora
Presión de estrangulación	Aumenta ligeramente	Aumenta ligeramente	Mejora o disminuye
Viscosidad del fluido	Aumenta ligeramente	Aumenta ligeramente	Mejora

TEMA CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.2.3.4. Modelos Reológicos

La espuma puede ser tratada como un fluido homogéneo con densidad y viscosidad variable. Durante una operación con espuma, la calidad depende de la presión y la temperatura, así como de la geometría de flujo (interior de tubería o espacio anular). La presión tiene que ser determinada usando la ecuación de balance de energía mecánica en la cual el término de la caída de presión por fricción depende del modelo reológico de la espuma. De ahí que es muy importante tener un modelo reológico que describa el comportamiento de la espuma.

Debido a la complejidad única del flujo con espuma, los modelos plásticos de Bingham y Ley de Potencias no pueden ser aplicados directamente. Este hecho ha motivado a muchos investigadores a aplicar modelos reológicos No-Newtonianos continuos tradicionales con modificaciones, para describir el comportamiento de las espumas.

Una aproximación teórica a la reología de una espuma fue presentada por Einstein en 1906, quien propuso una ecuación para la viscosidad de espumas con calidades que varían entre 0 y 54 %:

$$\eta_f = \mu(1.0 + 2.5\Gamma) \dots\dots (1)$$

donde:

$\eta_f$ , viscosidad de la espuma.

$\mu$ , viscosidad de la base líquida.

$\Gamma$ , calidad de la espuma (fracción).

Hatschek's en 1910, propuso una ecuación para la viscosidad de una espuma con interferencia de burbujas y una calidad entre 0 y 74 %:

$$\eta_f = \mu(1.0 + 4.5\Gamma) \dots\dots (2)$$

Su siguiente teoría describe la viscosidad de una espuma causada por el corte de un fluido contenido entre burbujas de gas paralelepípedas. La calidad de la espuma para esta

segunda teoría oscila en el rango de 75 a 97 %. La viscosidad de la espuma en este rango se expresa por la siguiente ecuación:

$$\eta_f = \mu \left( \frac{1}{1 - \Gamma^{1/3}} \right) \dots\dots (3)$$

Cabe mencionar que esta ecuación (3) no aplica para calidades del 97 %.

Mitchell en 1969 demostró que la espuma se comporta como un fluido plástico de Bingham con base en su trabajo experimental en tubos capilares y ecuaciones para la viscosidad de la espuma, derivadas empíricamente.

$$\left. \begin{aligned} \eta_f &= \mu(1.0 + 3.6\Gamma) , & 0 \leq \Gamma \leq 54\% \\ \eta_f &= \mu \left( \frac{1}{1 - \Gamma^{0.49}} \right) , & 54\% \leq \Gamma \leq 97\% \end{aligned} \right\} (4)$$

Igualmente, esta ecuación no aplica para el flujo de gas puro.

Krug, sin embargo, presentó una lista de viscosidad plástica y punto de cedencia de espumas como una función de la calidad (Tabla No. 2).

Beyer et al. en 1972 fueron los primeros en formular un modelo reológico para espumas a partir de datos experimentales y de un piloto a escala en laboratorio. Sus observaciones sugirieron que la espuma se comporta como un fluido plástico de Bingham. No obstante, no demostraron una dependencia del punto de cedencia ( $\tau_y$ ) con la fracción de volumen de líquido o la calidad de la espuma.

Okpobiri e Ikoku, en 1986 estudiaron experimentalmente la reología de la espuma simulando las condiciones de un agujero, usando un viscosímetro anular concéntrico. Concluyeron que la espuma es un fluido Ley de Potencias del tipo pseudo plástico, donde



los índices de comportamiento de flujo (n) y de consistencia (k) son función de la calidad de la espuma. De esta manera, presentaron una tabla que contiene las propiedades del fluido para diferentes calidades de espumas (Tabla No. 3).

**TABLA No. 2.- VISCOSIDAD PLÁSTICA Y PUNTO DE CEDENCIA DE ESPUMAS (KRUG, 1971).**

Calidad	Viscosidad plástica (cp)	Punto de cedencia (lbf/100 ft <sup>2</sup> )
0	1.02	0
0-25	1.25	0
25-30	1.58	0
30-35	1.60	0
35-45	2.40	0
45-55	2.88	0
55-60	3.36	0
60-65	3.70	14
65-70	4.30	23
70-75	5.00	40
75-80	5.76	48
80-86	7.21	68
86-90	9.58	100
90-96	14.38	250

TABLA No. 3.- PROPIEDADES DE FLUJO PARA ESPUMAS (OKPOBIRI &amp; IKOKU, 1986).

Calidad		k's	Índice de consistencia de flujo k	n'
Rango de $\Gamma$	$\Gamma$ Promedio	Lbf-seg <sup>n'</sup> /ft <sup>2</sup>	Lb <sub>m</sub> seg <sup>n'-2</sup> /ft	
0.96 a 0.977	0.97	0.0946	2.566	0.326
0.94 a 0.96	0.95	0.1228	3.323	0.290
0.91 a 0.92	0.915	0.2262	6.155	0.187
0.89 a 0.91	0.90	0.2079	5.647	0.200
0.84 a 0.86	0.85	0.1828	4.958	0.214
0.79 a 0.81	0.80	0.1344	3.635	0.262
0.77 a 0.78	0.775	0.1236	0.343	0.273
0.74 a 0.76	0.75	0.1078	2.918	0.295
0.72 a 0.73	0.715	0.1061	2.8716	0.293
0.69 a 0.71	0.70	0.1026	2.777	0.295
0.65 a 0.69	0.67	0.1022	2.766	0.290

A partir de una revisión de la literatura disponible, se encontró estadísticamente que el modelo Ley de Potencias, se ajusta mejor que el modelo Plástico de Bingham.

#### 1.2.3.5. Ecuaciones de Flujo para espumas.

En el caso especial de un sistema bifásico como es una espuma, el gas está fina y uniformemente disperso en la fase líquida, se puede entonces asumir como fluido homogéneo, con lo cual no se requerirá una ecuación para la interfase. La espuma consiste de un componente compresible (gas) y otro incompresible (líquido). El componente incompresible es fácil de manejar debido a que tiene densidad constante. En cambio, la parte compresible requiere mucho más atención, debido a que su densidad depende de la temperatura y presión.

La presión es analíticamente acoplada con la fracción de volumen del gas por medio de un factor de fricción. Una versión mejorada por Lord en 1981 sobre la ecuación de caída de presión y el método de Spoerker et al. en 1991 se usaron en la derivación de la ecuación siguiente.

**1.- Ecuación de Estado.**

La relación entre la variación de la densidad de un fluido en presencia de presión y temperatura está en término de la ecuación de estado. Para propósitos de ingeniería, la forma más práctica de la ecuación de estado para gases reales es la llamada Ley de los Gases esto es (Govier & Asís, 1987):

$$V_g = \frac{ZRT}{M_g p} \dots\dots\dots (5)$$

donde:

- V<sub>g</sub>, Volumen específico de gas (ft<sup>3</sup>/lb)
- Z, factor de compresibilidad del gas
- M<sub>g</sub>, Peso molecular del gas (lbm/lb-mole)
- R, Constante del Gas = 10.73 (psia-ft<sup>3</sup>/lb-mol °R)
- T, Temperatura absoluta (°R)
- p, presión absoluta (psia)

Otra ecuación de estado sugerida para el gas es la ***Ecuación Virial*** (truncada después del segundo término), propuesta por Reid et al. en 1987:

$$V_g = \frac{RT}{M_g} \left( \frac{1}{p + p_e} + B' \right) \dots\dots\dots (6)$$

donde, p<sub>e</sub> es el exceso de presión debido a la tensión superficial

$$p_e = \frac{4\sigma}{r} \quad (\sigma, \text{tensión superficial}; r, \text{radio de la burbuja}).$$

B' es el segundo coeficiente modificado de Virial.

El exceso de presión puede ser despreciado para cálculos ingenieriles, es decir, la ecuación (6) se reduce a:

$$V_g = \frac{RT}{M_g} \left( \frac{1}{p} + B' \right) \dots\dots\dots (7)$$

Las ecuaciones de Estado para flujo de espumas ascendente y descendente pueden ser expresadas como:

$$v = \frac{a}{p} + b \dots\dots\dots (8)$$

donde v, es el volumen específico de la espuma.

a, b se definen en la Tabla No. 4. Las expresiones que los definen toman diferentes formas de acuerdo a la geometría de flujo, en el caso del espacio anular se consideran 3 fases, pues se tiene la presencia de recortes de la formación.

**2.- Ecuaciones de Energía Mecánica.-**

Establecidas las ecuaciones de estado, el siguiente paso es usar ecuaciones de momento y energía para analizar el comportamiento dinámico de la espuma. La ecuación de energía mecánica puede ser considerada ya sea como consecuencia de la ecuación de momento o como una forma reducida de la ecuación total de Energía.

Para flujo descendente en el interior de la tubería de perforación, la diferencial de la Ecuación de balance de energía mecánica es:

$$\frac{udu}{g_c} - \frac{gd(VD)}{g_c} + Vdp + \frac{2u^2 fd(MD)}{g_c D} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

donde:

- u, velocidad promedio de la espuma [ft/seg]
- f, factor de fricción fanning
- g, aceleración debida a la gravedad
- $g_c$ , 32.2 [ft-lb<sub>m</sub>/lb<sub>r</sub>-s<sup>2</sup>]
- MD, profundidad desarrollada, [ft]
- VD, profundidad vertical, [ft]
- D, diámetro interior de la tubería de perforación, [in]

La velocidad promedio de la espuma, u, puede obtenerse usando la ecuación de continuidad. En términos de volumen específico, se puede expresar como:

$$u = cv = \frac{ac}{p} + bc \dots\dots\dots (10)$$

donde el coeficiente c se define también en la tabla No. 4.

Sustituyendo la ecuación (10) en la (9), la ecuación diferencial de balance de energía mecánica toma la forma siguiente:

$$\frac{dp}{d(MD)} = F_p(MD, p) \dots\dots\dots (11)$$

Para flujo ascendente anular, la ecuación diferencial de balance de energía mecánica tiene la forma:

$$\frac{udu}{g_c} - \frac{gd(VD)}{g_c} + Vdp - \frac{2u^2 fd(MD)}{g_c(D_h - D_p)} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

donde D<sub>h</sub>, diámetro del agujero descubierto [in]

D<sub>p</sub>, diámetro exterior de la tubería de perforación [in]

La velocidad promedio de la espuma en el anular se describe también con la ecuación (10). Sustituyendo la velocidad anular en la ecuación (12) tendremos la siguiente ecuación diferencial de balance de energía mecánica para flujo anular ascendente:

$$\frac{dp}{d(MD)} = F_A(MD, p) \dots\dots\dots (13)$$

Las ecuaciones (11) y (13) pueden resolverse numéricamente. Los métodos numéricos se usan para calcular una secuencia de valores de presión correspondientes a valores discretos de la profundidad desarrollada. La contrapresión, como es sabido, sirve como una condición de frontera para la ecuación (13). Las expresiones de  $F_p$  y  $F_A$  están dadas en el anexo A.

**TABLA No. 4 COEFICIENTES EN LA ECUACIÓN DE ESTADO PARA ESPUMAS.**

Coeficientes	Interior de tubería	Anular	A través de barrena (c')
a	$W_g ZRT$ $M_g$	$W_g ZRT$ $M_g$	N/A
b	$(1 - W_g)V_l$	$W_l V_l + W_s V_s$	N/A
c ó c'	$\frac{4}{\pi D^2} (m_g + m_l)$	$\frac{4}{\pi (D_h^2 - D_p^2)} (m_g + m_l + m_s)$	$\frac{m_g + m_l}{A_{jt}}$

**3.- Caída de presión a través de las toberas.-**

Para calcular la caída de presión a través de una restricción pequeña, como es el caso de las toberas (Ver figura 1.2.3.5.1), se asume generalmente que:

- El cambio en la elevación es despreciable.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- La velocidad corriente arriba de la tobera es despreciable.
- La caída de presión por fricción a través de la tobera es despreciable.

Por lo que, la ecuación (9) se reduce a:

$$\frac{u du}{g_c} + v dp = 0 \dots\dots\dots (14)$$

Sustituyendo las ecuaciones (8) y (10) en (14), e integrando, llegamos a la siguiente expresión en términos de unidades de campo:

$$b(p_2 - p_1) + a \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) + 8.1 \times 10^{-4} U_n^2 = 0 \dots\dots\dots (15)$$

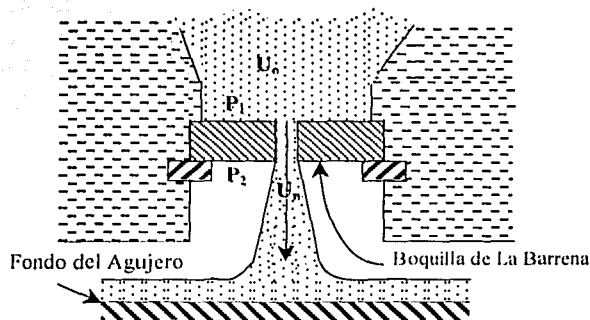
donde,  $p_1$ , presión corriente arriba de la tobera

$p_2$ , presión de fondo

$U_n$ , velocidad en la tobera y se define como

$$U_n = \frac{ac'}{p_2} + bc' \dots\dots (16)$$

Igualmente, la ecuación (15) puede resolverse mediante métodos numéricos para obtener la presión corriente arriba de la tobera  $P_1$ . La presión de fondo  $P_2$  se puede calcular de antemano con la ecuación (13); mientras que  $c'$  se explica en el anexo A.



**FIG. 1.2.3.5.1. FLUJO A TRAVÉS DE LA TOBERA DE UNA BARRENA (OKPOBIRI & IKOKU, 1986).**

### **1.2.4 ADITIVOS PARA ESPUMAS.**

Un fluido espumado es una mezcla compuesta de cuatro constituyentes principales:

- Aire comprimido (o gas)
- Agua (usualmente dulce)
- Surfactantes (jabón o agentes espumantes)
- Aditivos químicos

La combinación en la cual estos constituyentes son mezclados, determina las propiedades del fluido.

#### **1.2.4.1. Requerimientos de propiedades del fluido.**



Es esencial realizar una apropiada selección de los aditivos para alcanzar las propiedades reológicas adecuadas para condiciones específicas dentro del sistema. Los aditivos pueden ser elegidos para variar cualquier propiedad del fluido. Debido a que las espumas dependen de la viscosidad más que de la velocidad de levantamiento de los recortes y la limpieza del agujero, la viscosidad es obviamente una propiedad importante de control.

La inestabilidad del agujero es un problema generalmente resuelto con el uso de un fluido espumado. Esto es particularmente cierto, cuando se tienen expuestas formaciones químicamente inestables.

Desafortunadamente no podemos aislar el problema de corrosión, especialmente asociado con la presencia de oxígeno. Al igual que con los fluidos convencionales, los inhibidores químicos de corrosión pueden ser incorporados a la espuma para evitar este problema.

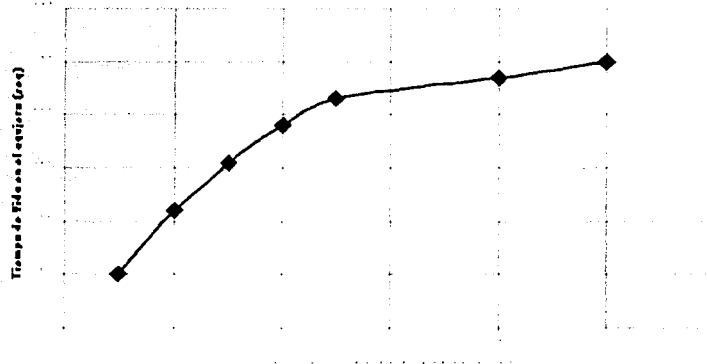


### 1.2.4.2. Aditivos químicos.

- *Aire comprimido.-*

El aire o gas es el principal componente de la espuma. Los volúmenes de aire requeridos para la perforación con espuma son mucho menores que los requeridos de aire puro o cuando se usa niebla para la perforación, ya que la espuma usa viscosidad en lugar de velocidad para limpiar el agujero. Esto reduce los requerimientos de compresión y disminuye la presión superficial de inyección requerida cuando se compara con el uso de niebla.

El volumen actual de aire requerido dependerá de la condición del agujero que esté siendo perforado, sin embargo el aire o el gas deben mantenerse entre 55 y 97 % para mantener una espuma. Por arriba de este rango, se tendrá la transición del fluido a niebla o gas. Por debajo del rango, la mezcla será un fluido aireado.



**FIG. 1.2.4.2.1. CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE VS. VIDA MEDIA DE LA ESPUMA (ROBERTSON, 1992).**

Dependiendo de la profundidad, diámetro del agujero y presión de fondo deseada, los gastos de aire para operaciones con espumas normalmente se encuentran en el rango de 600 ft<sup>3</sup>/min (scfm) a 1500 ft<sup>3</sup>/min (scfm) a presiones de 400 a 1200 psi. Los volúmenes de gas en las espumas son menores que los asociados con la perforación con aire ya que el fluido se mueve mucho más lento en el anular. Debido a la alta concentración de la fase líquida presente, la presión de inyección superficial será mayor que cuando se usa aire puro (alto factor de fricción) sin embargo, es menor comparada con el uso de niebla (menor velocidad).

Una regla de dedo es que la espuma requerirá aproximadamente del 35 al 65 % del volumen de gas usado en la perforación con aire puro o gas.

- **Agua.-**

El agua es incluida en los fluidos espumados como el principal vehículo para el acarreo de otros aditivos líquidos. El agua constituirá del 98 a 99 % de la fase líquida de una espuma estable y el 95-96% de la porción que no es gas de una espuma rígida. La fase líquida, en cambio, se compone del 3 - 45 % en volumen del sistema total de fluido.

Por principio, aproximadamente ¼ a 1/3 del gasto de líquido requerido para perforar convencionalmente podría ser usado para perforar con espuma. Por ejemplo, si una aplicación en particular requiere 240 gpm de lodo, cerca de 60 a 80 gpm de líquido se inyectarían para crear una buena espuma.

- **Surfactante o agentes espumantes.-**

Los principales agentes usados para generar espumas son los surfactantes. Todos los surfactantes consisten de moléculas que tienen un grupo hidrofílico unido a una cola larga hidrofóbica, la cual es usualmente una cadena de hidrocarburos pesados. Los

agentes espumantes se clasifican de acuerdo a la naturaleza del grupo hidrofílico, por lo que pueden ser aniónicos, catiónicos, anfotéricos o no-iónicos. Cuando es posible, las moléculas de los surfactantes se orientan por sí mismas así que el grupo hidrofílico permanece en un ambiente acuoso y la cola hidrofóbica permanece en un ambiente no-acuoso. Por consiguiente se concentrarán en la interface gas-líquido de las espumas. Donde, pueden aumentar o disminuir la tensión superficial del líquido y pueden fortalecer o debilitar las paredes de las burbujas. No todos los surfactantes actúan como agentes espumantes, algunos desestabilizan la estructura de la espuma dando lugar a los antiespumantes.

Una espuma estable incluirá 1 a 2% en volumen de agente espumante. Cuando se adiciona la concentración apropiada de aire comprimido, la viscosidad producida será similar a aquella que presenta una crema de afeitarse. Los surfactantes aniónicos son altamente solubles en la mayoría de los líquidos, y producen una espuma con buena estabilidad termal y son convenientes para el uso a muy bajas temperaturas superficiales. Su principal inconveniente es el alto costo comparativamente. Otros surfactantes aniónicos que pueden ser usados como agentes espumantes son los sulfonatos alfa olefinas, estos no son caros, presentan un buen comportamiento cuando se mezclan con agua y son muy resistentes a la contaminación con hidrocarburos. Sin embargo son inestables en presencia de salmueras, además de que no toleran bajas temperaturas superficiales.

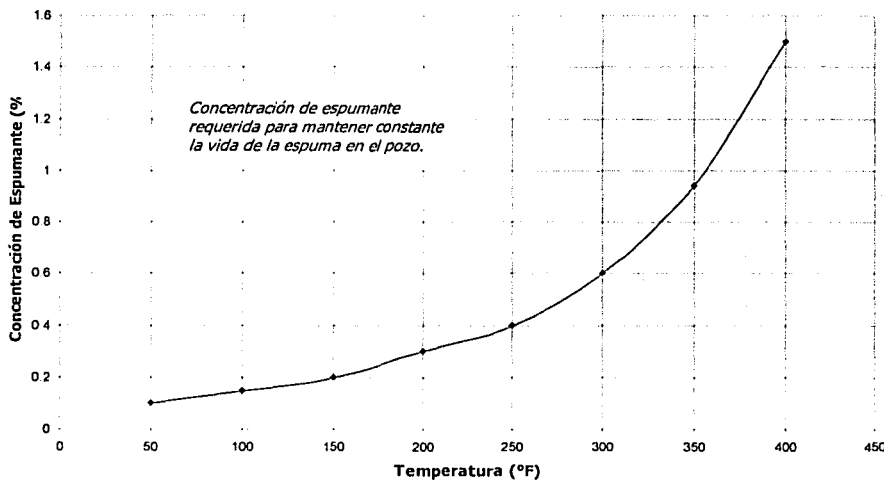
Frecuentemente, los agentes espumantes comerciales contienen tanto agentes espumantes aniónicos, como activadores de espuma, estos últimos tienen la función de mejorar la estabilidad de la espuma.

Ligeramente menor es la concentración de espumante que necesita una espuma rígida. La diferencia en la viscosidad la hace la bentonita u otros polímeros. Cuando se mezcla una espuma, la cantidad y tipo de espumante a usar depende de las condiciones del agujero y las propiedades deseadas del fluido. Estos factores deben ser analizados en cuanto a costo del fluido al decidir la mezcla final.

La estabilidad de la espuma es la más impactada por la concentración del agente espumante en el líquido. La concentración más alta de jabón, la prolongación de la vida media de la espuma, como se muestra en la figura 1.2.3.2.3, es especialmente cierta para las espumas estables como opuestas a la espuma rígida.

La vida media de la espuma es mejor entendida en términos del tiempo en que permanezca la espuma estable bajo ciertas condiciones específicas. Cuando la espuma no es muy estable, la fase líquida se drena de la espuma, la fase gaseosa escapa, y la espuma presenta esencialmente un colapso.

La vida media disminuye al aumentar la temperatura debido a la excitación de las moléculas de líquido y gas, que llegan a moverse a velocidades más altas, actuando como auto-catalizadores para el rompimiento de la espuma. La figura 1.2.4.2.2 muestra que la concentración de espumante debe incrementarse a medida que la temperatura aumenta para mantener cierta vida media de la espuma.



**FIG. 1.2.4.2.2. CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE VS. TEMPERATURA (ROBERTSON, 1992 Y ROVIG, 1992).**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Como se puede observar en la gráfica de la figura 1.2.4.2.2, la espuma permanece relativamente estable en un rango de temperatura menor a 200 °F, por encima de esta temperatura, la concentración de espumante debe incrementarse en forma dramática para poder mantener la estabilidad de la espuma.

Los surfactantes catiónicos no son comúnmente usados como agentes espumantes en operaciones de perforación. El tetra cloruro de amonio no se comporta bien en presencia de agua dulce, genera una pobre a mediocre estabilidad de la espuma y debe ser usado a altas concentraciones. Sin embargo, los surfactantes catiónicos pueden ser considerados para perforar lutitas sensibles al agua, debido a su capacidad de estabilizar las arcillas.

La temperatura también influye en la estabilidad de la espuma, al aumentar la temperatura, el ritmo de decaimiento de la espuma aumenta también. Esto implica aumentar la concentración de espumante, a temperaturas de fondo altas.

- ***Inhibidores de corrosión.-***

Cuando el oxígeno es incorporado al sistema de perforación, la corrosión es probablemente un hecho, así como incluir agua en el sistema de perforación incrementa también la tendencia de la corrosión. Obviamente, combinando estos dos factores dentro del sistema, es garantía que ocurra la corrosión. La corrosión por sí sola puede ser detenida, sin embargo con el uso apropiado de inhibidores químicos, puede retardarse la acción de la corrosión a un punto donde económicamente no afecte.

Los elementos del medio de perforación que afectarán la corrosión incluyen:

1. Tipo de la fase líquida en el sistema (ej. Volúmenes de aceite o agua).
2. La conductividad del fluido (estimando corrosión electroquímica).
3. pH del fluido.
4. Temperatura.
5. Presión.

6. Velocidad del fluido.
7. Gases disueltos en el sistema.
8. Contenido de oxígeno.
9. Contenido de gas o ácido corrosivos (CO<sub>2</sub> ó H<sub>2</sub>S).
10. Presencia de sólidos.
11. Bacterias.
12. Metal de la sarta de perforación y la TR expuesto al fluido.

• **Polímeros.-**

Los polímeros son usados en los fluidos de perforación espumados por una variedad de razones. Pueden ser usados como agentes viscosificantes para mejorar la capacidad de acarreo, como agentes lubricantes para disminuir el factor de fricción del fluido, o para estabilizar químicamente el pozo, particularmente cuando las lutitas y las arcillas están presentes. La Tabla No. 5 muestra los polímeros comúnmente usados en sistemas espumantes, y sus usos respectivos.

**TABLA No. 5. POLÍMEROS COMÚNES.**

USO COMÚN	TIPO DE POLÍMERO
Control de viscosidad/Agua dulce	Poliacrilamidas (PHPA) Carboxy-Metil Celulosa (CMC) Hydroxy-etil Celulosa (HEC) Goma guar.
Control de viscosidad /Salmuera	Bio-polímeros (Goma Xanthan o XC) Goma guar.
Estabilidad térmica	Bio-polímeros
Estabilidad de Ph	Bio-polímeros
Estabilidad del pozo	KCl y substitutos

**REGLAS DE DEDO**

Cada situación debe ser completamente evaluada antes de mezclar cualquier componente de la espuma, y cada intento debe ser realizado para optimizar las propiedades de un sistema espumado en particular. No es posible en todos los casos generalizar, pero la mezcla de una espuma es similar.

La mayoría de las espumas estables consisten de los siguientes componentes en los rangos volumétricos que se muestran en la tabla No. 6.

**TABLA No. 6. RANGO DE CONCENTRACIONES COMUNES.**

Componente	Propósito	%V total	%V líquido
Aire o gas	Fluido Base	55-97	N/A
Agua	Aditivo de Transporte	1-45	97-98
Espumante	Estabilidad, Viscosidad	2-6	2-15
Otros químicos	Corrosión, Viscosidad	< 1	< 1
Goma Guar	Viscosidad (solamente espumas rígidas)	0.2	< 1
Bentonita	Viscosidad, Estabilidad (solamente espumas rígidas)	3-4	N/A

Una formulación típica para 1 barril de espuma estable incluye:

- 1 bbl de agua dulce.
- ½ a 2 gal de agente espumante.
- ¼ gal de inhibidor de corrosión.
- 4 lbs de cal

Así también, una formulación típica para un barril de espuma rígida incluye:

12-14 lbs de bentonita.

1-1.5 lb de sosa cáustica

½ - ¾ lb de CMC

0.4-0.8 gal (0.5- 2% en volumen) de espumante.

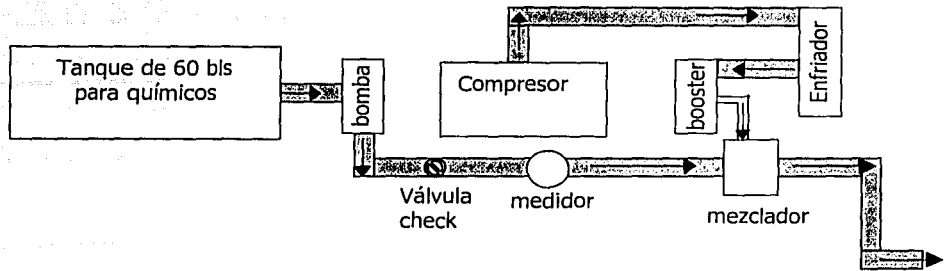
### **1.2.5 MEZCLA DE ADITIVOS.**

Así como con los fluidos convencionales de perforación, cualquier cambio o adición de un nuevo químico a la espuma, debe ser probado en superficie para determinar cualquier inconveniente aparente que pueda ocasionar algún cambio no deseado en el sistema. Debido a la naturaleza compresible de la espuma y al cambio continuo del comportamiento reológico resultante, no todos los efectos de cambio podrán ser visibles en las pruebas piloto.

La figura 1.2.5.1 muestra un ensamble típico para mezclar la espuma y un equipo de inyección. Es muy similar a un ensamble de perforación con aire y es esencialmente el mismo ensamble usado para operaciones de perforación con niebla, incluyendo una bomba de inyección para la fase líquida.

Primeramente, los aditivos químicos deben ser mezclados en un tanque con el agua requerida hasta lograr una fase líquida homogénea para inyectarla al pozo. Este tanque debe estar montado en un patín solamente para la adición de químicos. Puede estar instalado en un trailer, -en forma similar a un camión de cementación- y completarlo con una bomba de inyección y un compresor de aire en un solo paquete.





**FIG. 1.2.5.1. ENSAMBLE DE PERFORACIÓN CON ESPUMA -USANDO AIRE- (SCOTT ET AL., 1995).**

Cuando se mezcla la espuma se adicionan los agentes viscosificantes, tales como los polímeros. Si se trata de una espuma rígida, se adiciona gel al agua antes de mezclarla con otros aditivos, tales como inhibidores de corrosión; al final se adiciona el agente espumante. Una vez que los líquidos están completamente mezclados en el tanque, son inyectados en la corriente de aire o gas directamente en la línea de salida del compresor. La mezcla normalmente pasa por un generador de espuma que consiste de una sección de tubería de mayor diámetro en comparación del resto de la línea de inyección.

Para que se genere la espuma, se necesita una caída de presión, esto se logra incrementando el diámetro de la línea de inyección con un factor de dos o tres en relación a una distancia relativamente corta. Sin embargo, si no se logra generar una verdadera espuma debido al tiempo que alcanza el fluido inyectado en el fondo, la caída de presión a través de la barrena debe ser suficiente para producir una verdadera espuma.

Debido a que la espuma tiene una excelente capacidad de acarreo, la cual se basa en la viscosidad más que en la velocidad, la velocidad anular requerida para una espuma es casi la necesaria para un lodo de perforación convencional, es decir, 100 a 300 ft/min.

### 1.2.6 EQUIPO PARA PERFORACIÓN CON ESPUMA.

El equipo auxiliar básico para la perforación con espuma es muy similar al requerido para la perforación con aire o niebla.

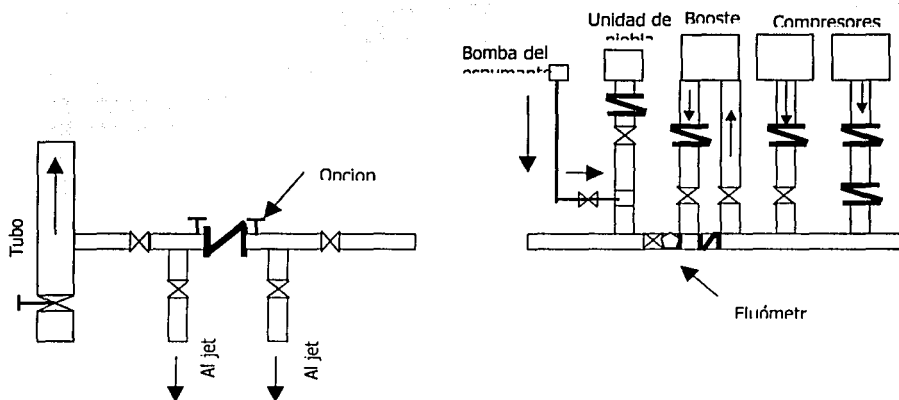
- **Equipo de Compresión.-**

Se puede usar un equipo de compresión de aire o un equipo propulsor (Booster). Cuando la inyección de líquido comienza junto con la inyección de gas o aire, la presión de inyección será mayor que cuando se usa gas solo. Sin embargo, como el gasto de inyección de líquido aumenta por encima del nivel inicial, la presión de inyección puede disminuir, como se muestra en la figura 1.2.3.2.3 y no se requerirá entonces ningún propulsor (booster).

Los compresores de aire estándar no son de gasto variable normalmente, por lo que se usa un gasto de inyección mayor al requerido. Una vez que se selecciona el compresor, los cálculos deben ser confirmados usando los gastos de inyección disponibles.

- **Equipo espumante.-**

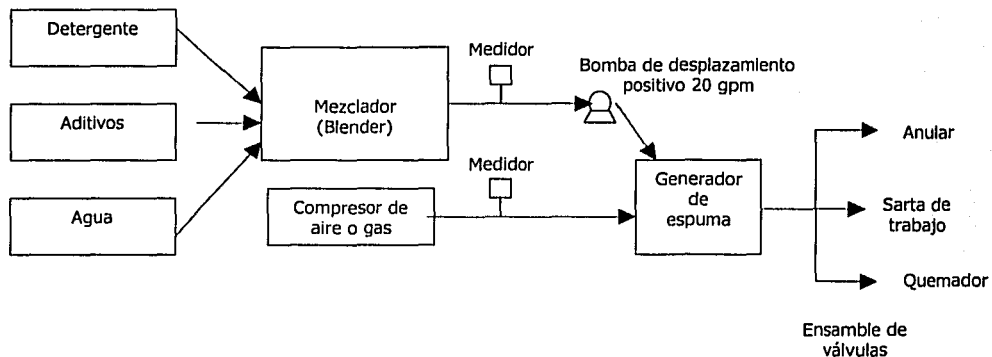
El equipo periférico requerido para perforar con espuma es también muy similar al necesario para la perforación con aire/gas/niebla. A continuación se muestra una instalación típica.



**FIG. 1.2.6.1. INSTALACIÓN DEL EQUIPO NECESARIO PARA PERFORAR CON ESPUMA (HOOKE ET AL., 1977).**

El agente espumante se requiere para mantener estable la espuma. El equipo de inyección de líquido consiste de una bomba triplex de desplazamiento positivo pequeña, capaz de manejar 30-50 gpm. Esta bomba se usa para inyectar en la corriente del gas, el agua, el agente espumante y los inhibidores de corrosión. En ocasiones, se usa una bomba para el espumante, que es más pequeña y permite mediciones más exactas de volúmenes pequeños de químicos a inyectarse, trabaja en el rango de 10 a 20 gph.

Un ejemplo de un sistema de mezclado de espuma se muestra en la figura 1.2.6.2. El ensamble de válvulas puede ser complejo o sencillo, según los requerimientos.



**FIG. 1.2.6.2. SISTEMA DE MEZCLADO DE ESPUMA (CARDEN, 1995).**

Los registradores de espumas y los medidores de volumen de gas son altamente deseables en cualquier operación de perforación bajobalance, particularmente en trabajos con espuma. Las válvulas usadas incluyen una válvula check y una válvula de apertura en cada línea de suministro de líquido para aislar las bombas y los tanques de líquido de la presión de inyección. Generalmente se instala una válvula de contrapresión en la línea corriente debajo de la cabeza rotatoria. Cuando se cierre, mantendrá la calidad de la

espuma y prevendrá que la espuma pierda su estabilidad. Esto puede ser usado para mantener la contrapresión durante la perforación o cuando se hacen conexiones.

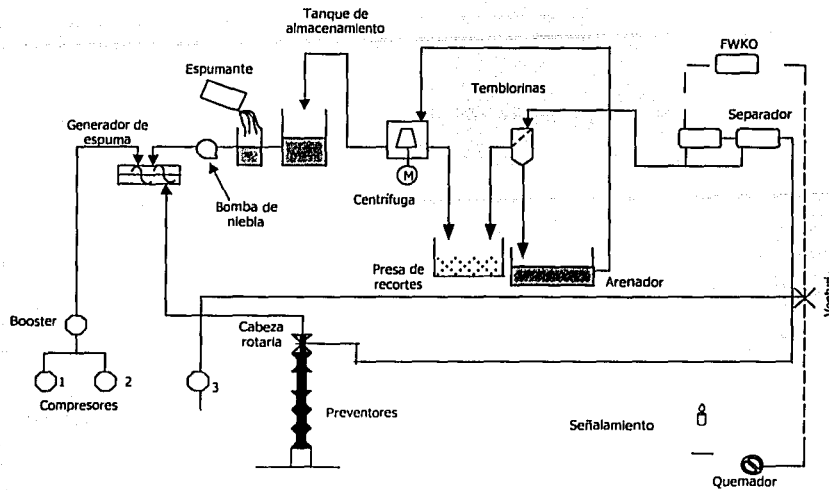
Por lo regular, cuando el pozo es somero y requiere poca compresión, todo el equipo descrito se puede incorporar en una sola unidad. Esta unidad consiste de un trailer de 10 x 30-40 ft con todo el equipo necesario montado en él. El tanque de mezclado, tendrá dos secciones de 10 bls cada una, la espuma puede ser mezclada en una sección mientras desde la otra se bombea. Se instala también un compresor de aire y una bomba de inyección de líquido.

### **1.2.7 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL RECICLADO DE ESPUMA.**

Existen dos métodos básicos para el reciclado de los fluidos espumados. El primero es romper en forma mecánica el fluido espumado que regresa. El otro método, patentado por Clearwater, Inc. en 1994 involucra rompimiento y reconstrucción de manera química la espuma.

#### **1.2.7.1. Sistema de recirculación mecánica.**

La fuerza inicial de empuje para la recirculación de la espuma por medios mecánicos fue un problema ambiental. RWE-DEA AG, una compañía Alemana, eligió para perforar un pozo un fluido espumado para prevenir el daño a la formación y para crear una condición bajobalanceada. Las regulaciones ambientales en Alemania dictaron que el fluido espumado de desecho debe ser inyectado en pozos para desechos. Para minimizar los volúmenes y costo de disposición, RWE-DEA y OIL TOOLS, INTERNATIONAL, desarrollaron un sistema de recirculación para espumas.



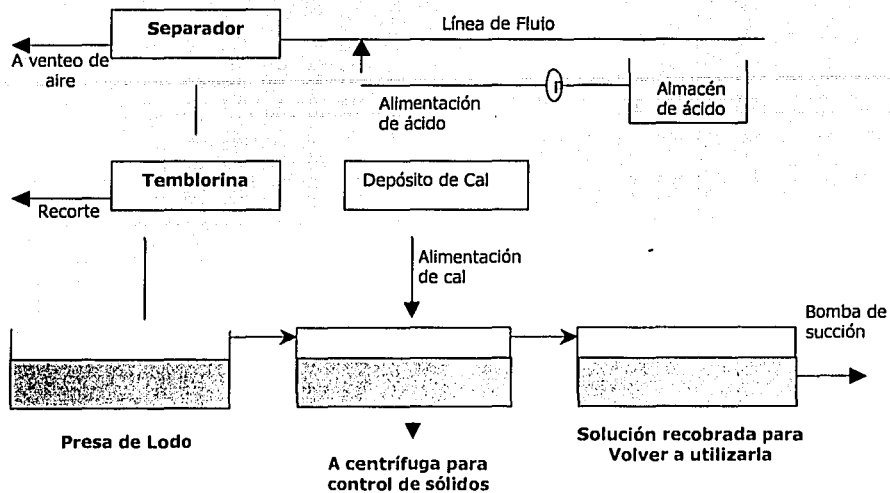
**FIG. 1.2.7.1.1. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN MECÁNICA DE ESPUMA (HANKING ET AL., 1996).**

El sistema está diseñado para recircular la fase líquida del fluido de perforación que retorna. Las fases gaseosa y sólida son separadas de la fase líquida cuando el fluido pasa a través de dos separadores alineados en serie. La espuma se rompe usando medios mecánicos dentro de los separadores. El gas se manda al quemador y los recortes se mueven del separador con la fase líquida hacia las temblorinas y equipo convencional de control de sólidos para eliminarlos del sistema. El sistema completo es contra-explosiones.

### 1.2.7.2. Sistema de recirculación química.

En adición a los sistemas mecánicos para la recirculación de los líquidos espumados, un proceso químico fue patentado en 1994 para recircular espumas usando medios químicos. El sistema químico trabaja con un simple principio de control de pH. Cuando el pH se baja en un sistema espumado, el fluido se vuelve inestable y se rompe. En el sistema que se

muestra en la figura 1.2.7.2.1, el ácido se adiciona a la línea de flujo corriente debajo de la cabeza rotatoria. La disminución del pH facilita el desprendimiento de la fase gaseosa del fluido espumado.



**FIG. 1.2.7.2.1. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN QUÍMICA DE ESPUMA (CLEARWATER, 1994).**

El fluido es entonces circulado a través de un separador donde el gas se separa. La fase gaseosa se envía al quemador, mientras que las fases líquida y sólida se mandan a un sistema convencional de control de sólidos del equipo de perforación. Igual que en un sistema convencional, los recortes grandes se remueven con las temblorinas, y los sólidos finos se eliminan con el equipo de control de sólidos. La fase líquida remanente tiene que ser tratada con cal para levantar el pH en el rango necesario para mantener la estabilidad de la espuma.

Este líquido tratado es nuevamente inyectado en la corriente de aire o gas para la generación de espuma por medios convencionales. El proceso se repite tantas veces el

fluido sea capaz de re-generar la espuma. Algunos de los espumantes químicos se pierden en este proceso, esto requiere el reemplazo total de los agentes espumantes en cada circulación. Con el proceso de recirculación química, los requerimientos químicos son del orden del 10% de un trabajo convencional con espumas, lo que implica un ahorro en cuanto a costos de material químico de aproximadamente el 90 %.

Algunos consejos para optimizar el uso de la recirculación de espuma con medios químicos se citan a continuación:

1. Se puede adicionar  $H_2SO_4$  como antiespumante en lugar de HCl, las razones incluyen:
  - a. Costo, el  $H_2SO_4$  es más barato en la mayoría de los lugares.
  - b. Seguridad, el  $H_2SO_4$  es más seguro que el HCl.
  - c. Formación de cloruros, después de varios ciclos con HCl, los cloruros se van formando y acumulando, provocando corrosión y degradando el comportamiento espumar/romper. El  $H_2SO_4$  pone sulfatos en el agua, que eventualmente crearán sales de calcio insolubles.
2. Automatizar la alimentación del ácido usando bombas químicas. La bomba dejará de operar por una señal producida por un medidor de pH en la línea de recirculación. La bomba química entonces alimentará el sistema de rocío del ácido.
3. Automatizar el proceso de recuperación usando un probador de pH para controlar la adición de cal para incrementar el pH.



## CAPÍTULO II



## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL FLUIDO ESPUMADO BPU.**

---

Entre las diversas aplicaciones de los fluidos ligeros, una de las más atractivas es la perforación de yacimientos en condiciones de bajobalance o casi bajobalance. Esta técnica permite traspasar zonas de producción con un daño mínimo. Por supuesto el buen conocimiento de los mecanismos hidráulicos y el transporte de recortes de cada sistema complejo es un deber para una perforación segura y económica.

Este capítulo presenta un esfuerzo inicial en la experimentación y modelado de las propiedades de flujo de un sistema espumado usado en la Región Sur –como referencia se le asignó las siglas BPU. Se propone usar equipo de laboratorio, equipo en escala real y datos reales de campo como herramienta para la evaluación de la estabilidad y reología de la espuma. Con base en todos estos datos, se tratará de ajustar funciones propuestas para explicar el comportamiento del fluido observado.

El fluido espumado de perforación que se propone, BPU, tiene la siguiente composición química base, la cual puede verse mejorada en cuanto a la presencia de algunos aditivos, dependiendo de las características de la formación que se esté atravesando o las condiciones operativas que se tengan.

**Concentración**

Agua dulce, como base del sistema.	100.0 %
Bentonita, como viscosificante.	2.0 – 3.0 % W
Sosa cáustica, como alcalinizante.	0.10 % W
Polímero.	0.2 – 1.5 % W
Espumante.	1.0 – 2.0 % V

Este diseño cumple con las siguientes características:

- Es estable a 150 °C.
- Puede ser inhibido y es reciclable.
- No contamina el medio ambiente.
- Es manejable y de preparación accesible a las instalaciones comunes en los equipos de perforación.
- Es posible alcanzar densidades hasta de 0.30 g/cc.
- Presenta una reología adecuada para alcanzar capacidades de acarreo de recortes suficiente para mantener el pozo limpio durante la perforación.

## **2.2. METODOLOGÍA.**

---

### **2.2.1 RELACIÓN CAUSA-CONSECUENCIA.**

En esta etapa del análisis y priorización del problema, se da respuesta a las preguntas: ¿Por qué se presenta la situación? y ¿Cómo nos afecta esta situación?

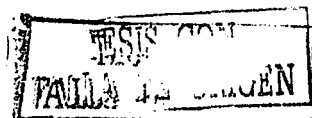
De la forma como se analicen las causas y consecuencias de un problema o variables se orienta el planteamiento de su solución; así es que, con el propósito de obtener un modelado del comportamiento reológico, del fluido se realizó una Matriz de Vester para

facilitar la identificación y la relación de las causas y consecuencias del comportamiento reológico. La matriz de Vester es un formato de doble entrada en donde se ubican, tanto en filas como en columnas, las variables identificadas como importantes en el sistema analizado; es decir, para este caso las variables que se han considerado son las siguientes:

<i>Variable</i>	<i>Identificador</i>
1. Gasto de inyección de gas.	A
2. Gasto de inyección de líquido.	B
3. Caída de presión.	C
4. Densidad de la espuma.	D
5. Viscosidad de la espuma.	E
6. Contenido de sólidos en el fluido base.	F
7. Temperatura	G

A continuación se colocan dentro de la matriz y se califica el nivel de causalidad (directa o indirecta) de cada variable sobre cada una de las demás, de acuerdo a la siguiente escala:

- 0 ----- No es causa
- 1 ----- Es causa indirecta
- 2 ----- Es causa medianamente directa
- 3 ----- Es causa muy directa



Variables	A	B	C	D	E	F	G	Total Activos
A		0	3	3	1	0	2	9
B	0		3	3	3	0	2	11
C	0	0		0	0	0	0	0
D	0	0	3		0	0	0	3
E	0	0	0	0		0	0	0
F	0	0	2	3	3		0	8
G	0	0	0	3	3	0		6
<b>Total Pasivos</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	

Este cálculo corresponde al grado de causalidad o consecuencia que cada problema tiene sobre los demás del sistema de producción. El total activo representa la suma del puntaje horizontal de cada variable y corresponde a la apreciación del grado de causalidad de la variable sobre las demás; es decir, un puntaje alto significa que la variable influye o repercute en muchas otras o viceversa. Mientras que el Total pasivo, es la suma del puntaje vertical de cada variable y responde a la apreciación del grado de causalidad de los demás sobre el problema analizado, es decir, el nivel de consecuencia; es decir, un puntaje alto quiere decir que la variable es causada por la influencia de muchas otras. Gráficamente, tenemos lo siguiente:

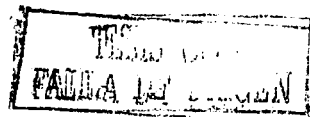
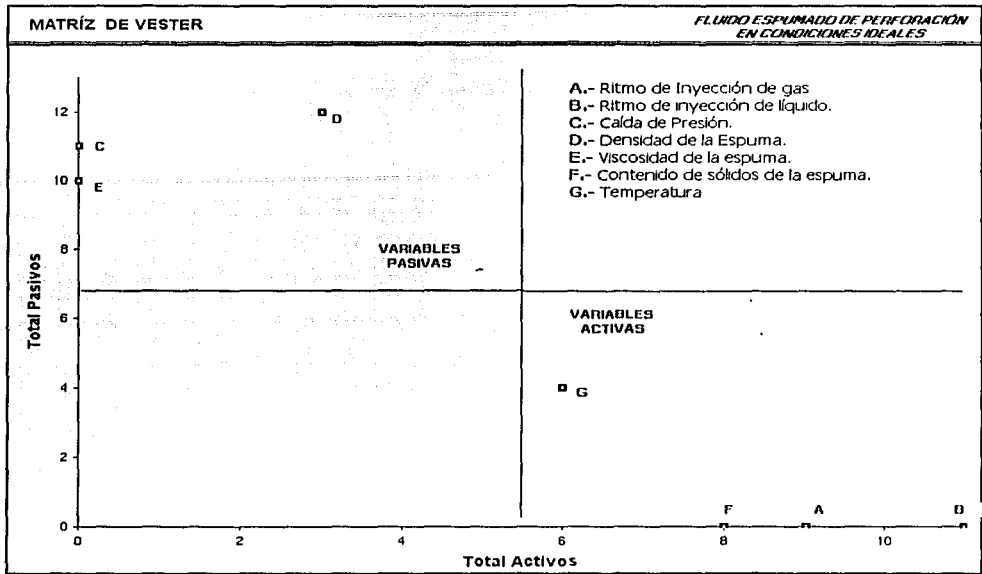


FIG. 2.2.1.1. MATRIZ DE VESTER.



Es importante aclarar que esta matriz ha sido elaborada pensando en el objetivo de este trabajo que es, el modelamiento reológico del fluido espumado BPU en forma ideal, es decir, sin contaminantes sólidos ni líquidos, con el propósito de determinar sus límites de estabilidad y funcionamiento en tales condiciones.

Trabajos posteriores son recomendables, considerando contaminantes sólidos y/o líquidos, con el propósito de determinar los límites operativos del fluido bajo la influencia de estas otras variables, así como también sería interesante analizar su capacidad de acarreo a diferentes ángulos de inclinación del pozo.

En la figura 2.2.1.1, se distinguen dos regiones importantes que limitan las Variables Activas de las Variables Pasivas. Las Variables Activas son aquéllas que tienen un total activo alto y un total pasivo bajo y representan las variables que influyen mucho sobre las demás, pero que no son causadas por otras; en esta categoría tenemos:

- Gasto de inyección de gas (A).
- Gasto de inyección de líquido (B).
- Contenido de sólidos en la espuma (F).
- Temperatura (G).

Estas variables son las propiedades principales que determinarán el comportamiento reológico del fluido BPU y deben tener una alta prioridad en su intervención ya que ellas afectan de manera importante a las demás. Las variables Pasivas, son aquellas que tienen un total pasivo alto y un total activo bajo y representan las variables que no influyen de manera importante sobre otros, pero que son influenciadas por la mayoría de las demás. Estas variables pueden utilizarse como indicadores de cambio y eficiencia de la intervención de las variables activas, ya que manifiestan los cambios hechos en ellas.

### **2.2.2. MEDICIONES REOLÓGICAS.**

El diseño de la matriz de pruebas involucra conocer en primer lugar las propiedades físicas que mayormente se ven afectadas por nuestras variables activas, es así que haremos una introducción a la experimentación reológica sobre espumas.

Reología (Del griego *rheos* = flujo, *logos* = conocimiento) está definida como la materia del flujo y la deformación. Esto comprende un espectro del comportamiento de materiales. La caracterización de la reología de una espuma incluye una valoración del grado de elasticidad; el cambio en las propiedades con el incremento del tiempo o el esfuerzo; considerando además el esfuerzo de cedencia, el cual es la fuerza por unidad de área a la cual la burbuja se desliza cambiando de posición cuando la espuma comienza a fluir.

El esfuerzo de cedencia es proporcional a la tensión superficial en las superficies gas/líquido dentro de la espuma. Éste es inversamente proporcional al diámetro de la burbuja.

Técnicas convencionales para medir la reología de fluidos no son muy apropiadas o bien no se pueden aplicar directamente para el estudio de espumas. Además a altos gastos de flujo y altas presiones, las espumas actúan como un fluido compresible por lo que es difícil obtener un solo valor para las propiedades reológicas.

En un estudio realizado por Burley y Shakerin<sup>1</sup> sobre Reología de espumas, encontraron que no se puede usar una sola curva para describir el comportamiento de la espuma en investigación. En este problema de multi-parámetros, la mayoría de los datos podrían ser descritos empíricamente por un modelo de flujo de fluido Ley de potencias con punto de cedencia en la ecuación estándar de la forma:

$$\tau = \tau_y + k \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^n \dots (1)$$

donde:  $\tau$ , esfuerzo de corte.

$\tau_y$ , esfuerzo de cedencia.

$k, n$ , son constantes para una curva de flujo dada que dependen del rango de las variables experimentales.

### 2.2.2.1 Medición de la Viscosidad.

Para las espumas la viscosidad,  $\eta$ , es una función de la velocidad de corte; la viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de corte. Esta propiedad es llamada "adelgazamiento de corte" y los fluidos que muestran este comportamiento son llamados "Pseudo plásticos".

---

<sup>1</sup> R. Burley and M. Shakerin, Int. J. Eng. Fluid Mech., 5; (2); 115-141 (1992).

Las mediciones de viscosidad de espuma no pueden ser realizadas entre "platos planos infinitos", por lo que varias geometrías son empleadas para aceptar un campo de flujo equivalente y de ahí determinar la viscosidad.

Existen 3 diferentes tipos de aparatos que comúnmente se usan para medir la viscosidad u otras propiedades reológicas.

a. **Viscosímetro capilar,**

**Principio:**

Causa que una muestra de fluido fluya a un ritmo medido en movimiento laminar bajo un gradiente de presión medido a través de un tubo capilar de precisión de diámetro y longitud conocidos.

**Recomendaciones:**

- Mantener condiciones de T kte.
- Aplicar correcciones para los efectos de entrada y de energía cinética.

**Características:**

- La muestra está sujeta a un ritmo de corte que varía de cero en el eje del capilar para alcanzar un máximo en la pared

**Ventajas:**

- Simpleza mecánica
- Permitir alcanzar velocidades de corte altas

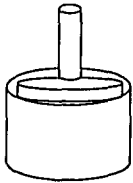


**Desventajas:**

- No permiten que la misma muestra de fluido sea sometida para mantener el flujo y por lo tanto no es conveniente para medir el comportamiento de fluidos dependientes del tiempo.

**b. El viscosímetro rotacional o de cilindro concéntrico.**

**Principio:**



La muestra de fluido colocada en el espacio anular entre un cilindro estacionario y uno rotatorio sea sometida al corte, y el torque que actúa sobre el cilindro estacionario sea medido. La velocidad de corte es determinable a partir de la geometría del sistema y la velocidad del cilindro rotatorio. El esfuerzo de corte es obtenido del torque medido.

**Recomendaciones:**

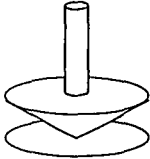
- Se deben tener precauciones para asegurar flujo laminar y condiciones de temperatura constantes.
- -Se pueden requerir correcciones por efectos de fronteras.
- La velocidad de corte es casi constante a través del fluido y el espacio anular.

**Ventajas:**

- Amplio rango de velocidades de corte.
- Es útil para el estudio de las propiedades viscosas de fluidos no-Newtonianos.

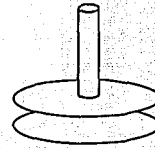
c. **El viscosímetro de cono y plato o el viscosímetro similar de plato paralelo.**

**Principio:**



Somete una muestra de fluido el cual se mantiene en un espacio muy estrecho entre un plato plano rotacional y un cono invertido o un plato paralelo al corte laminar.

Medidas de la velocidad rotacional y el torque permiten el cálculo de la velocidad de corte y el esfuerzo de corte.



**Recomendaciones:**

- Asegurar condiciones isotérmicas.
- Evitar flujos secundarios.
- Los flujos secundarios son minimizados usando pequeños ángulos del cono y bajas velocidades rotacionales.
- Para un fluido desconocido no es posible predecir la magnitud de los flujos secundarios en la geometría de cono y plato y entonces es preferible usar el plato en paralelo.
- Con correcciones apropiadas para los efectos Inerciales, un instrumento de cono y plato con un ángulo de cono menor a 2 grados daría resultados adecuados para la mayoría de las aplicaciones de un capilar.

*Para Geometría de cono y plato:*

- El ángulo entre la cara del cono y el plato plano es normalmente menor a 3 grados.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Es apropiado para velocidades de corte de 1 a  $3 \times 10^3 \text{ seg}^{-1}$ .

**Ventajas:**

- Los efectos de frontera son usualmente despreciables.
- Se tiene una casi fidelidad de la velocidad de corte en la geometría de cono y plato.
- Cálculo directo de la velocidad de corte y el esfuerzo de corte en cono y plato.

*En la ausencia de flujos secundarios fuertes:*

- Son útiles por un rango razonable de velocidades de corte.
- Son ideales para el estudio de propiedades viscosas de fluidos no-Newtonianos a bajas y moderadas velocidades de corte.

**Desventajas:**

- Necesidad de diferenciación de los datos de torque-velocidad rotacional en la geometría de plato paralelo.
- El análisis para el cono y plato es aproximado cuando existen efectos elásticos, y que los flujos secundarios pueden causar errores en la interpretación de datos.
- Velocidades de corte modestas.

Con el viscosímetro de cono y plato, las fuerzas normales son fácilmente relacionadas a la elevación del fluido en el tubo capilar ligadas al cono superior en las mediciones de la fuerza total en el cono. Sin embargo, la utilidad de este aparato está limitada a velocidades de corte modestas.

El cilindro concéntrico puede también ser usado para determinar fuerzas normales mediante la explotación del efecto Weissenberg (Weissenberg, 1947, 1948) donde la diferencia en presión sobre los cilindros interior y exterior es medido. Generalmente este

aparato, el cual está también limitado a velocidades de corte modestas, da solamente una estimación cruda de las fuerzas normales debidas a las pequeñas diferencias en presión que deben ser medidas mientras se desprecien los efectos inerciales.

Las limitaciones de las bajas velocidades de corte de los instrumentos de cono y plato y de cilindro concéntrico son cubiertas con un viscosímetro capilar. En este caso las fuerzas normales pueden ser relacionadas al empuje en el tubo capilar, alternadamente al diámetro del jet del fluido descargado del capilar. Meister y Biggs indican que las mediciones del empuje y el diámetro de un jet de fluido de un capilar permiten resultados confiables para el esfuerzo normal a velocidades de corte en el rango de  $4 \times 10^3$  a  $10^5$   $\text{seg}^{-1}$ . Powell y Middleman (1969)<sup>2</sup> notaron, sin embargo que cuando se usan medidas del diámetro del jet, puede haber una discrepancia sistemática en los datos dependientes del tubo del diámetro.

La relajación del jet a su diámetro final ha sido también usado para proveer una estimación directa del tiempo de relajación del fluido (Metzner et al., 1966).

En estas tres geometrías la cantidad impuesta es el campo de flujo y la cantidad medida es el esfuerzo resultante. Para una geometría capilar, ya sea el ritmo de flujo es impuesto (vía bomba de desplazamiento positivo) y la caída de presión es medida, o la caída de presión es impuesta y el gasto de flujo medido.

- **Efecto del tamaño de la abertura a la burbuja.**

Superficies sólidas crean una perturbación a la estructura y a la fracción de volumen local de la fase dispersa para cualquier sistema multifásico. La regla de dedo es que el tamaño de la fase dispersa sea menor a un décimo de la distancia entre las fronteras para que la medición de la viscosidad sea correcta. Para muchos sistemas de espumas el tamaño de las burbujas está en el orden de milímetros. Por consiguiente la abertura en una geometría Couette o de plato paralelo debe ser de 10 mm o mayor. Esto es usualmente

---

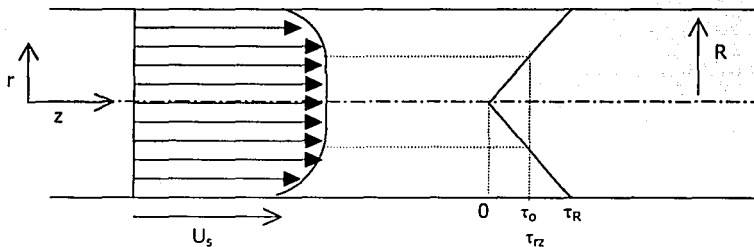
<sup>2</sup> Powell, R.L., and S. Middleman, Trans. Soc. Rheology 13, 111 ( 1969).

impráctico. Por lo que a menos que se genere una espuma muy fina, las mediciones deben ser realizadas en geometrías de capilares de diámetro grande.

- **Efectos de resbalamiento y esfuerzo de cedencia.**

Para altas fracciones de volumen espumas con esfuerzos de cedencia, si la distribución de esfuerzos a través de la geometría de medición no es uniforme habrá regiones de la espuma que están bajo su esfuerzo de cedencia y están en movimiento de cuerpo rígido y otras regiones que están fluyendo. En adición, si el esfuerzo está por debajo del esfuerzo de cedencia en todas partes entonces la espuma se resbalará en las fronteras más que en el flujo y la viscosidad medida no reflejará la viscosidad del fluido sino la "fricción de desplazamiento" de la espuma a través de la superficie sólida.

La situación para el flujo en un capilar con resbalamiento se muestra en la figura 2.2.2.1 el resbalamiento de la espuma sobre una capa delgada de fluido en la pared, y ya que el esfuerzo disminuye linealmente de su valor máximo en la pared a cero en el centro del tubo, habrá un núcleo donde el esfuerzo está por debajo del esfuerzo de cedencia y la espuma no fluirá.



**FIG. 2.2.2.1. FLUJO DE ESPUMA EN UN CAPILAR.** La espuma se desliza sobre la pared sólida y está en flujo tapón en el centro del capilar donde el esfuerzo de corte es menor al esfuerzo de cedencia de la espuma. El esfuerzo de cedencia es lineal desde un valor máximo  $\tau_R$  en la pared a cero en el centro independientemente de la reología de fluido.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La situación para flujo en una geometría de disco paralelo es aún más complicada. El esfuerzo es constante a lo largo de la abertura pero varía linealmente desde el radio exterior donde su valor es máximo a cero en el centro del disco. En esta situación la velocidad de resbalamiento varía con la posición radial. La espuma puede fluir a posiciones radiales mayores que un valor mínimo y rotar como un cuerpo sólido cerca del centro del disco. Una forma para eliminar el resbalamiento es usar platos o paredes con superficies rugosas<sup>3</sup>.

Sin embargo un camino útil para determinar la existencia de resbalamiento en la pared así como para medir el esfuerzo de cedencia es realizar los experimentos usando dos geometrías diferentes. El camino estándar de hacer esto es realizar mediciones usando dos capilares con diferente radio, dos geometrías Couette con diferentes aberturas, o dos geometrías de plato paralelo con diferente espaciado.

- **Cambios en el tamaño de la burbuja y el Drenaje.**

Los modelos estructurales para espumas de alta fracción de volumen muestran que los valores de cedencia son inversamente proporcionales al tamaño de la burbuja<sup>4,5,6,7</sup>. En ocasiones, la mayoría de las espumas se tornan toscas por la difusión del gas a través de las películas delgadas que separan las burbujas y por la ruptura de la burbuja y la coalescencia<sup>8</sup>. Este efecto de tornarse tosca la espuma por la difusión del gas causa que el tamaño promedio de la burbuja aumente con el tiempo así que el esfuerzo de cedencia disminuye con el tiempo. También en cuanto al drene de la espuma, la fracción de volumen de líquido en la espuma será menor en la parte alta de la espuma y mayor en la parte baja<sup>9,10,11</sup>. Debido a que la viscosidad y el esfuerzo de cedencia son una función de

<sup>3</sup> S.A. Khan, C.A. Schnepfer, and R.C. Armstrong, *J. Rheology*, 32; 69-92 (1988)

<sup>4</sup> A.M. Kraynik, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 20; 325-357 (1988).

<sup>5</sup> S. A. Khan and R. C. Armstrong, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 22; 1-22 (1986).

<sup>6</sup> S. A. Khan and R. C. Armstrong, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 25; 61-92 (1987).

<sup>7</sup> S. A. Khan and R. C. Armstrong, *J. Rheology*. 33; 881-911 (1989).

<sup>8</sup> D. Weaire and J.P. Kermode, *Phil Mag. B.* 48; 245-259 (1983).

<sup>9</sup> P. B. Rand and A. M. Kraynik, *Soc. Petrol. Engrs. J.*; 152-154; Feb. 1983.

<sup>10</sup> M. A. Fortes and S. Coughlan, *J. Appl. Phys.* 76; 4029 (1994).

la fracción de volumen, la reología de la espuma variará verticalmente. Ambos de estos efectos hacen difícil la medición de la viscosidad de la espuma.

Lo que se necesita es un capilar con un tiempo de residencia corto o u una celda de flujo para una geometría Couette o de plato paralelo.

### **2.2.2.2. Medición del Esfuerzo de Cedencia.**

Un rasgo característico de los fluidos celulares (con burbujas o baches) a fracciones de volumen de la fase dispersa por encima de 70 %V aproximadamente es la existencia de un esfuerzo de cedencia.

Las técnicas para medir el esfuerzo de cedencia ha sido recientemente revisado por Boger. Las tres técnicas más aplicadas para las espumas son:

- a) Extrapolación de esfuerzos de cedencia medidos obtenidos de la gráfica de gasto vs. Caída de presión, corregidos previamente por resbalamiento como ya se explicó<sup>12,13</sup>.
- b) Mediciones usando un "dispositivo de paleta"<sup>14</sup>.
- c) Midiendo módulos elásticos vs. Deformación.

Boger da una discusión amplia sobre las limitaciones de determinar un verdadero esfuerzo de cedencia a partir de las curvas de flujo extrapoladas a una velocidad de corte cero. Invariablemente los datos dan un comportamiento curvo y por la tanto la extrapolación es subjetiva. Esto depende, sin embargo, del rango de velocidades de corte cubierto por los datos y de las predicciones del investigador.

El "dispositivo de paleta" fue introducido por Boger<sup>16</sup> para medir los valores de cedencia de una arcilla y de un lodo rojo. El dispositivo de la figura 2.2.2.2.1, comprende de una

---

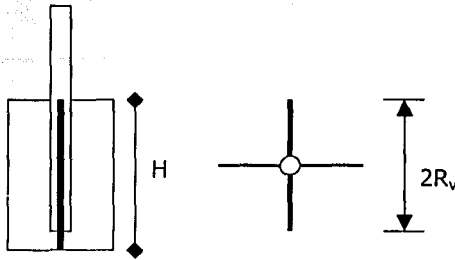
<sup>11</sup> H. M. Princen, *J. Coll. Interf. Sci.* 134; 188 (1990).

<sup>12</sup> M. Keentok, *Rheology. Acta* 21; 325 (1982).

<sup>13</sup> H. M. Princen and D. Kiss, *J. Coll. Interf. Sci.* 128; 176 (1989).

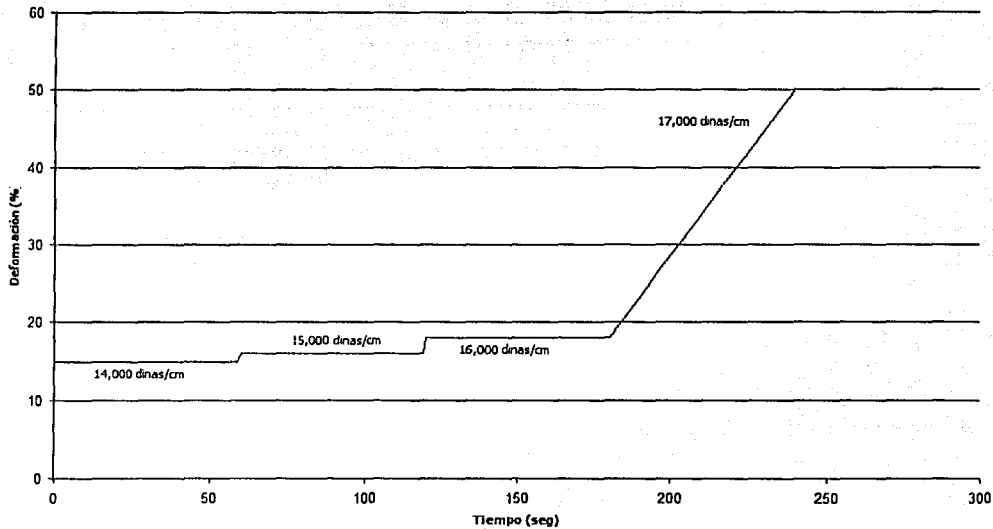
<sup>14</sup> Q.D. Nguyen and D.V. Boger, *J. Rheology* 29; 335 (1985).

paleta plana con un radio  $R_v$  a las puntas de las paletas. El dispositivo es sumergido en la muestra que es tomada en un contenedor con un radio mucho mayor que  $R_v$ . Las paletas mantienen el material del resbalamiento, y el contenedor largo de la muestra mantiene los niveles de esfuerzo bajos en los extremos, tal que la cedencia solamente ocurre en las puntas de las paletas.



**FIG. 2.2.2.2.1. DISPOSITIVO DE PALETA PARA MEDIR EL ESFUERZO DE CEDENCIA.** La paleta, está unida a un transductor de torque sobre un reómetro de esfuerzos, es sumergida en una copa larga que contiene el fluido.

Debajo del esfuerzo de cedencia del material, mientras el torque aumenta la paleta rota en el medio elástico hasta un nuevo equilibrio de posición angular como se muestra a continuación en la figura 2.2.2.2.1.





**FIG. 2.2.2.2.1. DEFLEXIÓN ANGULAR VS. TIEMPO PARA UNA EMULSIÓN MEDIDA USANDO UNA GEOMETRÍA DE PALETAS.** Una serie de incrementos de esfuerzos de corte es impuesta a la emulsión. Debajo del esfuerzo de cedencia la emulsión se deforma y entonces permanece en reposo; por arriba del esfuerzo de cedencia la copa continúa rotando mientras el material se corta.

Cuando el torque aumenta más allá del esfuerzo de cedencia, la paleta comienza a rotar continuamente mientras el material es cortado. Esto se muestra en la figura anterior. El esfuerzo requerido para producir una rotación continua es el esfuerzo de cedencia,  $\tau_o$  y es calculado a partir del torque impuesto,  $T$ , mediante:

$$\tau_o = \frac{T}{2\pi R_v^3 \left[ \frac{H}{R_v} + \frac{1}{3} \right]} \dots (2)$$

donde H es la longitud del bob. El segundo término en el denominador considera los efectos del fondo del dispositivo de paleta<sup>16,15</sup>.

La determinación del esfuerzo de cedencia a partir del módulo elástico considera que el esfuerzo de cedencia es el esfuerzo requerido para romper la estructura estática en el material. Esto es equivalente al módulo elástico del material  $G'$ , multiplicado por la deformación que rompe la estructura  $\gamma_c$ . El módulo elástico es medido usando mediciones oscilatorias dinámicas. La deformación crítica es determinada midiendo el módulo vs. la deformación aplicada para encontrar la deformación a la cual el módulo comienza a disminuir mientras la estructura se va rompiendo<sup>16</sup>. El esfuerzo de cedencia es calculado como:

$$\tau_o = G' \gamma_c \dots (3)$$

<sup>15</sup> A.S. Yoshimura and R.K. Prud'homme, J. Rheology 31 (8); 699-710 (1987).

<sup>16</sup> M.C. Grand and W.B. Russel, Phys. Rev. E. 47 (4); 2606-2614 (1993).

### **2.2.3 ESTABILIDAD DE ESPUMAS.**

En cuanto a estabilidad, se pueden considerar dos tipos de espumas: dinámicas y estáticas. Una espuma dinámica es aquella que ha alcanzado un estado de equilibrio dinámico entre ritmos de formación y decaimiento. Una espuma estática es aquella en la cual el ritmo de formación es cero; la espuma, una vez formada es susceptible a colapsarse sin la regeneración por medio de la agitación o la entrada de gas. Así que la medición típica de una espuma dinámica es el volumen de espuma en equilibrio, es aplicable a espumas transcientes; mientras que la medición típica de la espuma estática es el ritmo de colapso, es aplicable a espumas de alta estabilidad, tales como las generadas de soluciones de detergentes o proteínas.

La estabilidad de la espuma es dependiente de dos principales factores:

1. La presencia de surfactantes en la fase líquida y la resistencia específica de su película resultando en una alta o baja capacidad de mantener la estructura de una burbuja individual.
2. El drenado de la fase líquida debido a las fuerzas gravitacionales y a la diferencia de densidad entre las fases líquida y gaseosa.

Dependiendo del espesor de la película de líquido que separa las burbujas, la densidad de la espuma puede variar ampliamente, cambiando desde casi la densidad del líquido hasta casi la densidad del gas. Un parámetro usado para caracterizar una espuma dada es su calidad, definida como el volumen de gas por volumen de espuma, como ya se mencionó en el Capítulo I. La calidad, siendo un volumen de fracción de gas, es muy sensible a cambios de presión, debido a su alta compresibilidad de la fase gaseosa. Mientras incrementa la presión, el volumen de burbujas disminuye, y la calidad también disminuye.

Por tal razón, cuando se especifica la calidad de la espuma, debe acompañarse de la especificación de presión y temperatura.

Para calidades menores al 50%, la espuma es considerada como una dispersión de burbujas de gas en un líquido. Bajo tales condiciones, las burbujas no están en contacto con alguna otra. Como una consecuencia de esta discusión, bajas calidades de burbujas se caracterizan por burbujas casi esféricas separadas por paredes de líquido rígido. Como el líquido se drena de las paredes por efecto de gravedad, las burbujas de gas tienden a deformar a poliedros. Este drene de líquido causa que las paredes de las burbujas lleguen a ser cada vez más delgadas, hasta que se rompen eventualmente. Así, una forma para mejorar la estabilidad de la espuma es mediante el incremento de la viscosidad de la fase líquida.

Cuando dos burbujas llegan a estar en contacto, el gas en la burbuja más pequeña se difunde en la más grande, la más pequeña desaparece y la más grande aumenta en tamaño. Esto sucede debido a que la presión que existe en el interior de la más pequeña es mayor con respecto a la más grande.

Cuando las paredes de la burbuja llegan a ser muy delgadas, la presencia de un surfactante previene entonces el rompimiento por un largo tiempo. Este efecto es atribuido a las fuerzas electrostáticas cuando un surfactante iónico es adicionado, y a las fuerzas estructurales cuando un surfactante aniónico es usado (Israelachvili)<sup>17</sup>. La adición de un surfactante es muy importante cuando se trata de hacer que la espuma tenga buena estabilidad.

Debemos enfatizar que diferentes surfactantes proveen diferentes estabilidades de espuma si las condiciones cambian. Es decir, un surfactante que da una buena estabilidad bajo ciertas condiciones puede representar una pobre estabilidad bajo otras condiciones; por ejemplo, cuando la temperatura y la concentración de sal cambian.

---

<sup>17</sup> Israelachvili, J.N., *Intermolecular and surface Forces*, New York: Academic Press, 1985.

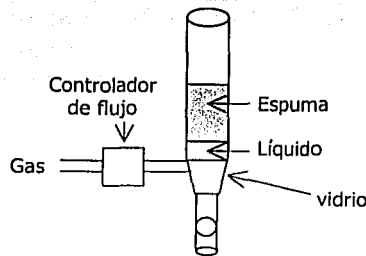
La evaluación de la estabilidad de la espuma fue hecha por medio de la adaptación del procedimiento ASTM 3519-76 titulada "Método de prueba estándar para una espuma en un medio acuoso". El método se basa en la medición del volumen drenado de la fase líquida como una función del tiempo. Las espumas se preparan por medio de agitación a 5200 rpm de 100 ml de una fase líquida durante 30 segundos en un mezclador. La espuma es inmediatamente transferida a un cilindro graduado de 1000 ml y volumen drenado es registrado a 1, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 20 y 25 minutos. Además, hay un registrador de tiempo cuando la mitad de la fase líquida se ha drenado (50 ml). Este valor es llamado Tiempo de Vida media ( $t_{1/2}$ ).

Aunque Ross-Miles propuso prepara la espuma en dos formas:

- Expansión de aire.
- Agitación con mezcladora o agitador.

**Expansión de aire.**

Esta técnica se usó para evaluar la estabilidad de la espuma en presencia de surfactantes, polímeros y sal. El equipo usado se puede ver en la figura 2.2.3.1.



**FIG. 2.2.3.1. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL APARATO PARA MEDIR ESPUMAS ESTÁTICAS.(SPE-64999).**

La espuma es generada en una columna de vidrio (diámetro interno = 7 cm, altura=50 cm) por el burbujeo del aire comprimido a 329 ml/min a través de un disco poroso (160-250  $\mu\text{m}$ ) de vidrio dentro de una solución espumante de 100 ml. El burbujeo se continúa hasta que la espuma alcanza una altura de 1000 ml. Entonces, la estabilidad de la espuma estática se mide con el tiempo al cual la altura de la espuma se colapsa a la mitad de la altura inicial.

### **Agitación con mezcladora o agitador.**

Se prepara la solución espumante (100 ml) y se aplica agitación mecánica en una mezcladora a 11,000 rpm /22 °C, durante 30 segundos. Para determinar la estabilidad y el comportamiento de la espuma se coloca en un recipiente graduado de 1000 ml (1 lt). Igualmente, la vida media se obtiene midiendo el tiempo requerido para que la espuma drene la mitad del volumen inicial de solución.

## **2.2.4 PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES PROPUESTOS.**

Como primer paso de la fase experimental es determinar la Estabilidad de la Espuma, conociendo su vida media a diferente concentración de espumante, este trabajo se puede realizar en un laboratorio de fluidos de perforación. El siguiente paso a seguir es preparar la espuma en el laboratorio de fluidos de perforación y medir su reología con cuatro instrumentos posibles:

- 1.- Viscosímetro capilar.
- 2.- Viscosímetro de geometría Couette, es decir, un viscosímetro rotacional.
- 3.- Viscosímetro de cono y plato.
- 4.- Viscosímetro de platos en paralelo.

De acuerdo al instrumento que se emplee, en el siguiente capítulo se explica el procedimiento de interpretación de datos. A partir de esta experiencia se pretende obtener un modelo reológico.

A continuación, lo siguiente es comprobar este modelo trasladándolo a cantidades de caídas de presión y caudales, esto se puede llevar a cabo en algunas instalaciones de un pozo Escuela o bien, en un sistema de circulación de laboratorio a escala piloto.

Es así que en seguida se describe el procedimiento de trabajo para todas estas etapas. ***Es importante aclarar que para efecto de este trabajo de investigación y debido a la disponibilidad de tiempo e instalaciones, nos concentraremos en lograr el modelo reológico en el laboratorio de fluidos de perforación,*** dejando como propuesta para trabajos posteriores de investigación, la corroboración del modelo en condiciones reales de trabajo o bien, casi reales (pozo escuela, sistema de circulación de laboratorio a escala piloto).

#### **2.2.4.1. Determinación del Modelo Reológico en el Laboratorio de Fluidos de perforación.**

En las instalaciones del laboratorio donde trabajamos contamos con viscosímetros rotacionales del tipo Fann-35 y Brookfield. No obstante, debido a la magnitud de las viscosidades que encontramos en las espumas, y a la falta de disponibilidad de accesorios (bob y camisa), la escala de medición que ofrece el viscosímetro Fann-35 no fue suficiente, así que todo el trabajo se realizó con un viscosímetro Brookfield, usando dos geometrías distintas pero conservando la misma relación de radios, esto es con el objeto de corregir por resbalamiento.

***Objetivo 1:*** *Efecto de la concentración de polímero y espumante en la Reología del fluido BPU.*

El primer objetivo de la prueba fue preparar el fluido espumado BPU a diferentes calidades de espuma: 55%, 60%, 70%, 80%, 90% y 95%, haciendo variar dos componentes: Concentración del Polímero en el fluido base (0.2 % y 1.0 %) y la concentración de

espumante (1.0 %, 1.5 % y 2.0 %). Tomar la reología de cada una de las espumas, densidad de la espuma, así como la reología y densidad del fluido base.

**Objetivo 2:** *Determinación de la vida media del fluido BPU.*

Medir la vida media de la espuma a diferente concentración de espumante (1.0 %, 1.5 %, 2.0 %), para los dos tipos de fluidos y para todas las calidades.

**Desarrollo:**

1.- Se prepararon dos tipos de fluidos base, los volúmenes suficientes para realizar las pruebas en forma secuencial, la composición de los fluidos fue:

<b>FLUIDO TIPO "A"</b>		
<b>Componente</b>	<b>Concentración</b>	<b>Volumen / peso</b>
Agua	100 %	1000 ml
Bentonita	3% W <sub>agua</sub>	30 gr
Sosa cáustica	0.1 % W <sub>agua</sub>	1 gr
Polímero	0.2 % W <sub>agua</sub>	2 gr

<b>FLUIDO TIPO "B"</b>		
<b>Componente</b>	<b>Concentración</b>	<b>Volumen / peso</b>
Agua	100 %	1000 ml
Bentonita	3% W <sub>agua</sub>	30 gr
Sosa cáustica	0.1 % W <sub>agua</sub>	1 gr
Polímero	1.0 % W <sub>agua</sub>	2 gr

2.- Comenzamos con el fluido tipo "A" y con la concentración de espumante de 1.0 %.

Se tomó la reología del fluido líquido base con un viscosímetro rotacional tipo Fann VG-35. En seguida se preparó una espuma de calidad 55% de la siguiente forma, tomamos en un vaso de 800 ml de capacidad, 360 ml de fluido base tipo "A" y se adicionaron 3.6 ml de espumante –correspondiente al 1.0 %- . En un agitador mecánico se incorporó aire al fluido base a razón de 3000 rpm durante 15 min, de manera que se formó la espuma, cuando el volumen de espuma alcanzó los 800 ml, en este momento ya se tenía la calidad 55 %. Se procedió entonces a medir su reología con un viscosímetro rotacional Brookfield con dos geometrías.

**Primer geometría,** se tomó una muestra de la espuma en un vaso de precipitados con diámetro de 4 cm, es decir, con radio de 2.0 cm (a este dato le llamaremos "Radio de camisa",  $R_c$ ), se usó la paleta de disco No. 1 del viscosímetro Brookfield, cuyo radio es 1.43 cm (a este dato le llamaremos "Radio del bob",  $R_{bi}$ ). Se inició la toma de lecturas. Este modelo de viscosímetro rotacional tiene 4 velocidades: 2, 4, 10 y 20 rpm; y su escala varía de 0 a 100 grados de deflexión. Esta operación se repitió 3 veces con el propósito de tener certeza de los valores leídos. Aunque únicamente se presentan los valores promediados.

La densidad de la espuma se tomó, tarando un vaso de precipitados en una balanza electrónica previamente calibrada y tomando un volumen conocido de espuma (40 ml), a partir de la definición de densidad ( $\rho = m/V$ ).

**FLUIDO BASE TIPO "A"**

Densidad = 1.02 g/cc                      Temperatura = 22 °C

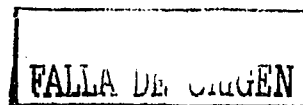
Viscosidad Plástica,  $\mu_p = 5$  cp

Punto de cedencia,  $Y_p = 4$  lb/100 ft<sup>2</sup>

**BPU – CALIDAD 55%**

Densidad = 0.34 g/cc

<i>Velocidad (rpm)</i>	<i>Lectura</i>
2	1
4	1
10	2
20	2





**Segunda geometría**, se tomó otra muestra de espuma de calidad 55% en un contenedor de vidrio, con radio de 1.7 cm aproximadamente, ( $R_{c2}$ ), cambiamos la paleta con disco No. 2 cuyo radio es de 1.20 cm ( $R_{b2}$ ), es conveniente aclarar que la relación de radios  $k$ , ( $k=R_c/R_b$ ) se conserva constante. En estas condiciones se tomaron las lecturas en las cuatro diferentes velocidades del viscosímetro Brookfield. El procedimiento se repitió tres veces para poder sacar un promedio de los valores.

FLUIDO BASE TIPO "A"		BPU – CALIDAD 55%	
Densidad = 1.02 g/cc	Temperatura = 22 °C	Densidad = 0.34 g/cc	
Viscosidad Plástica, $\mu_p = 5$ cp		<b>Velocidad (rpm)</b>	<b>Lectura</b>
Punto de cedencia, $Y_p = 4$ lb/100 ft <sup>2</sup>		2	1
		4	1
		10	1.5
		20	2

Este procedimiento se repitió para todas las pruebas, con los respectivos volúmenes de fluido y espumante de acuerdo a la calidad que se trabajó. A continuación se presentan los datos obtenidos en forma esquemática. La reología del fluido base solo cambia cuando variamos la concentración de polímero.

FALLA DE DATOS

**Calidad = 60 %**

$V_{fb}^{18} = 320$  ml    Densidad = 0.36 g/cc  
 $C_{esp}^{19} = 1.0$  %

*Geometría 1    Geometría 2*

Vel. (rpm)	Lectura	Lectura
2	1	1
4	2	2
10	2	2
20	3	3

**Calidad = 70 %**

$V_{fb} = 240$  ml    Densidad = 0.28 g/cc  
 $C_{esp} = 1.0$  %

*Geometría 1    Geometría 2*

Vel. (rpm)	Lectura	Lectura
2	7	8
4	8	9
10	8	13
20	13	14

Para las siguientes calidades, se cambiaron las geometrías, debido al aumento de viscosidad de la espuma probada. Así la geometría 1 se trató de una paleta con disco no. 3, donde se tuvo  $R_c=1.35$  cm,  $R_b=0.90$  cm. Para la segunda geometría se usó la paleta con disco no. 2, donde  $R_c=1.8$  cm,  $R_b=1.2$  cm.

**Calidad = 80 %**

$V_{fb} = 160$  ml    Densidad = 0.10 g/cc  
 $C_{esp} = 1.0$  %

*Geometría 1    Geometría 2*

Vel. (rpm)	Lectura	Lectura
2	14	15
4	21	16
10	26	25
20	36	30

**Calidad = 90 %**

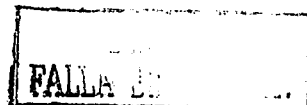
$V_{fb} = 80$  ml    Densidad = 0.10 g/cc  
 $C_{esp} = 1.0$  %

*Geometría 1    Geometría 2*

Vel. (rpm)	Lectura	Lectura
2	40	38
4	44	43
10	58	55
20	65	62

En el caso de la siguiente calidad, hubo la necesidad de cambiar nuevamente las geometrías a las siguientes: geometría 1, con paleta de disco no.5,  $R_c=0.99$  cm,  $R_b=0.55$  cm; paleta de disco no. 4,  $R_c=1.26$  cm,  $R_b=0.7$  cm.

<sup>18</sup>  $V_{fb}$ , volumen de fluido base  
<sup>19</sup>  $C_{esp}$ , concentración de espumante.



**Calidad = 95 %**

$V_{fb} = 40 \text{ ml}$       Densidad = 0.04 g/cc

$C_{esp} = 1.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	41	37.5
4	45	45.5
10	55	46.5
20	57	56

Las geometrías anteriores fueron las mismas, de acuerdo a la calidad que se medía, por tal motivo no se especifican en los datos subsiguientes.

**Calidad = 55 %**

$V_{fb} = 360 \text{ ml}$       Densidad = 0.357 g/cc

$C_{esp} = 1.5 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	1	1
4	1	1
10	2	1.5
20	2	2

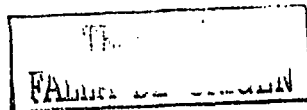
**Calidad = 60 %**

$V_{fb} = 320 \text{ ml}$       Densidad = 0.31 g/cc

$C_{esp} = 1.5 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	2	2
4	2.5	2
10	2.5	2.5
20	3	3



**Calidad = 70 %**

$V_{fb} = 240 \text{ ml}$       Densidad = 0.2775 g/cc  
 $C_{esp} = 1.5 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	7	8
4	9	9
10	13	14
20	14	14

**Calidad = 80 %**

$V_{fb} = 160 \text{ ml}$       Densidad = 0.1575 g/cc  
 $C_{esp} = 1.5 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	15	15
4	21	17
10	27	25
20	36	31

**Calidad = 90 %**

$V_{fb} = 80 \text{ ml}$       Densidad = 0.096 g/cc  
 $C_{esp} = 1.5 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	42	39
4	45	43
10	59	55
20	65	63

**Calidad = 95 %**

$V_{fb} = 40 \text{ ml}$       Densidad = 0.056 g/cc  
 $C_{esp} = 1.5 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	42	39
4	45	45
10	57	49.5
20	59	58

**Calidad = 55 %**

$V_{fb} = 360 \text{ ml}$       Densidad = 0.357 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	1	1
4	1	1
10	2	1.5
20	2	2

**Calidad = 60 %**

$V_{fb} = 320 \text{ ml}$       Densidad = 0.35 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	2	2
4	2	2
10	3	3
20	3	3

**Calidad = 70 %**

$V_{fb} = 240 \text{ ml}$       Densidad = 0.295 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	8	8
4	9	10
10	14	14
20	14	15

**Calidad = 80 %**

$V_{fb} = 160 \text{ ml}$       Densidad = 0.14 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	18	15
4	21	19
10	29	26
20	37	31

**Calidad = 90 %**

$V_{fb} = 80 \text{ ml}$       Densidad = 0.144 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	41	39
4	47	44
10	59	56
20	66	63

**Calidad = 95 %**

$V_{fb} = 40 \text{ ml}$       Densidad = 0.064 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	42	40
4	47	48
10	56	50.5
20	59	59

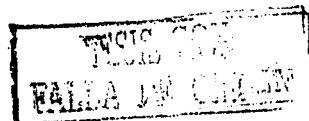
**FLUIDO BASE TIPO "B"**

Densidad = 1.02 g/cc

Temperatura = 22 °C

Viscosidad Plástica,  $\mu_p = 22 \text{ cp}$

Punto de cedencia,  $Y_p = 7 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2$



**Calidad = 55 %**

$V_{fb} = 360 \text{ ml}$       Densidad = 0.44 g/cc  
 $C_{esp} = 1.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	1	1
4	1.5	1
10	2	2.5
20	2	2.5

**Calidad = 60 %**

$V_{fb} = 320 \text{ ml}$       Densidad = 0.305 g/cc  
 $C_{esp} = 1.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	2.5	2
4	3	2.5
10	3.5	3
20	5	4.5

**Calidad = 70 %**

$V_{fb} = 240 \text{ ml}$       Densidad = 0.2775 g/cc  
 $C_{esp} = 1.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	15	12
4	19	13
10	23	16
20	26	20

**Calidad = 80 %**

$V_{fb} = 160 \text{ ml}$       Densidad = 0.22 g/cc  
 $C_{esp} = 1.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	22	23
4	27	27
10	35	33
20	39	39

**Calidad = 90 %**

$V_{fb} = 80 \text{ ml}$       Densidad = 0.1075 g/cc  
 $C_{esp} = 1.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	13	11
4	14	12
10	18	14
20	20	16

**Calidad = 95 %**

$V_{fb} = 40 \text{ ml}$       Densidad = 0.056 g/cc  
 $C_{esp} = 1.0 \%$

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	62	61
4	63	64
10	71	72.5
20	78	76.5

**Calidad = 55 %**

$V_{fb} = 360$  ml      Densidad = 0.3475 g/cc  
 $C_{esp} = 1.5$  %

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	1	1
4	1	1
10	2	2
20	2	2.5

**Calidad = 60 %**

$V_{fb} = 320$  ml      Densidad = 0.3675 g/cc  
 $C_{esp} = 1.5$  %

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	3	2
4	4	3
10	4	3
20	5	4

**Calidad = 70 %**

$V_{fb} = 240$  ml      Densidad = 0.3025 g/cc  
 $C_{esp} = 1.5$  %

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	17	13
4	19	13
10	24	17
20	26	21

**Calidad = 80 %**

$V_{fb} = 160$  ml      Densidad = 0.22 g/cc  
 $C_{esp} = 1.5$  %

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	24	24
4	28	27
10	35	33
20	40	40

**Calidad = 90 %**

$V_{fb} = 80$  ml      Densidad = 0.124 g/cc  
 $C_{esp} = 1.5$  %

*Geometría 1      Geometría 2*

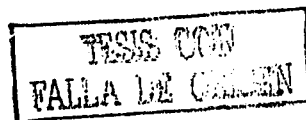
<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	14	12
4	16	12
10	18	14
20	20	17

**Calidad = 95 %**

$V_{fb} = 40$  ml      Densidad = 0.058 g/cc  
 $C_{esp} = 1.5$  %

*Geometría 1      Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	62	61.5
4	65	66
10	74	76
20	79	78



**Calidad = 55 %**

$V_{fb} = 360 \text{ ml}$     Densidad = 0.41 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1    Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	1	1
4	2	2
10	2	2
20	3	3

**Calidad = 60 %**

$V_{fb} = 320 \text{ ml}$     Densidad = 0.32 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1    Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	3	3
4	4	3
10	6	5
20	6	6

**Calidad = 70 %**

$V_{fb} = 240 \text{ ml}$     Densidad = 0.2625 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1    Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	17	14
4	19	17
10	24	20
20	26	22

**Calidad = 80 %**

$V_{fb} = 160 \text{ ml}$     Densidad = 0.24 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1    Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	24	24
4	29	27
10	35	33
20	40	39

**Calidad = 90 %**

$V_{fb} = 80 \text{ ml}$     Densidad = 0.096 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1    Geometría 2*

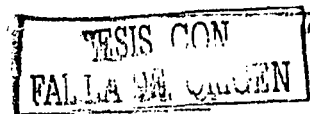
<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	14	13
4	15	14
10	18	18
20	21	19

**Calidad = 95 %**

$V_{fb} = 40 \text{ ml}$     Densidad = 0.086 g/cc  
 $C_{esp} = 2.0 \%$

*Geometría 1    Geometría 2*

<i>Vel. (rpm)</i>	<i>Lectura</i>	<i>Lectura</i>
2	64	64
4	68	67.5
10	75	77
20	80	79



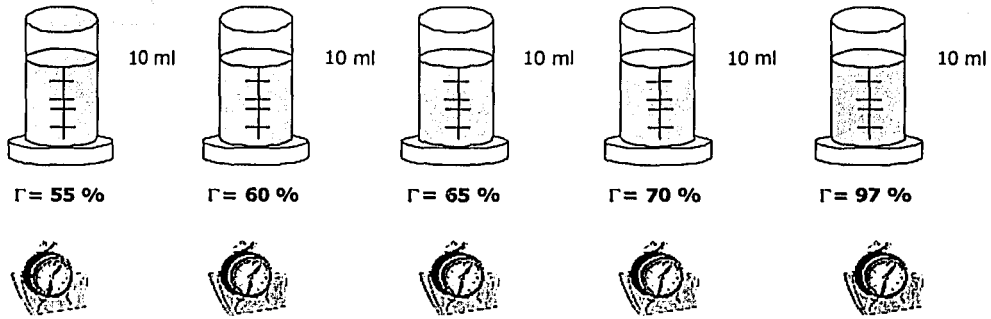


3.- En cada una de las pruebas anteriores se midió la vida media de la espuma, tomando una muestra de 100 ml de espuma en una probeta de vidrio graduada. En condiciones estáticas y a condiciones ambientales de presión y temperatura, se midió el tiempo que tardó la espuma en precipitarse en un 50 % de la fase líquida. Los resultados se muestran a continuación.

CALIDAD %	FLUIDO TIPO "A"			FLUIDO TIPO "B"		
	Tiempo de vida media Min			Tiempo de vida media Min		
	C <sub>esp</sub> =1.0 %	C <sub>esp</sub> =1.5	C <sub>esp</sub> =2.0	C <sub>esp</sub> =1.0	C <sub>esp</sub> =1.5	C <sub>esp</sub> =2.0
55	17.32	44.90	58.20	25.80	71.00	92.47
60	21.75	58.20	69.48	33.98	88.20	100.40
70	40.80	82.53	94.07	61.55	105.89	121.20
80	59.71	88.13	96.54	73.73	126.36	139.09
90	43.06	71.33	80.69	55.81	87.64	99.30
95	7.36	15.10	19.97	11.45	25.20	29.50

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Muestras sin contaminar



### 2.2.4.2 Validación del Modelo Reológico.

En un sistema de circulación de laboratorio a escala piloto se deben medir las caídas de presión principalmente a diferentes calidades de espuma, ya que en laboratorio se comprobó que el cambio de esta variable afecta directamente la magnitud de la viscosidad y por consiguiente las caídas de presión por fricción. De esta manera es posible validar el modelo reológico propuesto de laboratorio.

A continuación se presenta una matriz de pruebas, por supuesto, los gastos de gas y líquido deberán ajustarse a la capacidad del equipo utilizado, ya que los valores que aquí se presentan es considerando la capacidad del equipo de circulación a escala piloto del Instituto Mexicano del Petróleo en la Ciudad de México.

TESIS CON  
FALLA DE CALIFICACIÓN

ITEM	DESCRIPCIÓN	TIEMPO																												
<b>PRUEBA A... Contenido de espumante</b>																														
1	Preparar 1 m <sup>3</sup> del fluido base de acuerdo a la siguiente formulación: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua, 100 %</li> <li>▪ Bentonita, 3%W<sub>agua</sub></li> <li>▪ Sosa cáustica, 0.10 %W<sub>agua</sub></li> <li>▪ Polímero, 0.2 %W<sub>agua</sub></li> <li>▪ Espumante, 1.5 %V</li> </ul>	30 min (0.5 hrs)																												
<b>PRUEBA A-1</b>																														
<b>Contenido de polímero = 0.2 % W<sub>agua</sub></b>																														
2	Bombear la siguiente cédula.	1.85 min																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Calidad</th> <th>Q<sub>liq</sub> (lt/seg)</th> <th>Q<sub>gas</sub> (lt/seg)</th> <th>Tiempo circ. (seg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>55</td><td>8.10</td><td>10.39</td><td>33.6</td></tr> <tr><td>60</td><td>8.10</td><td>12.75</td><td>30.0</td></tr> <tr><td>70</td><td>8.07</td><td>20.31</td><td>24.0</td></tr> <tr><td>80</td><td>5.93</td><td>25.98</td><td>10.80</td></tr> <tr><td>90</td><td>4.42</td><td>41.09</td><td>7.8</td></tr> <tr><td>95</td><td>3.66</td><td>77.93</td><td>4.8</td></tr> </tbody> </table>	Calidad	Q <sub>liq</sub> (lt/seg)	Q <sub>gas</sub> (lt/seg)	Tiempo circ. (seg)	55	8.10	10.39	33.6	60	8.10	12.75	30.0	70	8.07	20.31	24.0	80	5.93	25.98	10.80	90	4.42	41.09	7.8	95	3.66	77.93	4.8	
Calidad	Q <sub>liq</sub> (lt/seg)	Q <sub>gas</sub> (lt/seg)	Tiempo circ. (seg)																											
55	8.10	10.39	33.6																											
60	8.10	12.75	30.0																											
70	8.07	20.31	24.0																											
80	5.93	25.98	10.80																											
90	4.42	41.09	7.8																											
95	3.66	77.93	4.8																											
<b>PRUEBA A-2</b>																														
<b>Contenido de espumante= 1.0 % W<sub>agua</sub></b>																														
3	Adicionarle 0.8% W <sub>agua</sub> (8 kg) de polímero al fluido base y homogenizarlo.	15 min (0.25 hr)																												
4	Bombear la siguiente cédula.	1.85 min																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Calidad</th> <th>Q<sub>liq</sub> (lt/seg)</th> <th>Q<sub>gas</sub> (lt/seg)</th> <th>Tiempo circ. (seg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>55</td><td>8.10</td><td>10.39</td><td>33.6</td></tr> <tr><td>60</td><td>8.10</td><td>12.75</td><td>30.0</td></tr> <tr><td>70</td><td>8.07</td><td>20.31</td><td>24.0</td></tr> <tr><td>80</td><td>5.93</td><td>25.98</td><td>10.80</td></tr> <tr><td>90</td><td>4.42</td><td>41.09</td><td>7.8</td></tr> <tr><td>95</td><td>3.66</td><td>77.93</td><td>4.8</td></tr> </tbody> </table>	Calidad	Q <sub>liq</sub> (lt/seg)	Q <sub>gas</sub> (lt/seg)	Tiempo circ. (seg)	55	8.10	10.39	33.6	60	8.10	12.75	30.0	70	8.07	20.31	24.0	80	5.93	25.98	10.80	90	4.42	41.09	7.8	95	3.66	77.93	4.8	
Calidad	Q <sub>liq</sub> (lt/seg)	Q <sub>gas</sub> (lt/seg)	Tiempo circ. (seg)																											
55	8.10	10.39	33.6																											
60	8.10	12.75	30.0																											
70	8.07	20.31	24.0																											
80	5.93	25.98	10.80																											
90	4.42	41.09	7.8																											
95	3.66	77.93	4.8																											

De ser posible, estas pruebas se deben repetir por lo menos tres veces con el fin de lograr cierta repetibilidad, o en su defecto poder aplicar un método estadístico para el manejo de datos.

Otra forma de validar el modelo reológico del fluido BPU, es medir las caídas de presión en un pozo real o bien en un pozo escuela, es así que el siguiente programa de trabajo está diseñado para realizarlo en las instalaciones del Pozo Escuela del Castaño perteneciente a Petróleos Mexicanos Exploración y Explotación Región Sur.

ITEM	DESCRIPCIÓN	TIEMPO												
<b>PRUEBA A. Contenido de espumante</b>														
1	Preparar 30 m <sup>3</sup> del fluido base de acuerdo a la siguiente formulación: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua, 100 %</li> <li>▪ Bentonita, 2%W</li> <li>▪ Sosa cáustica, 0.10 %W</li> <li>▪ Polímero, 0.2 %W</li> <li>▪ Espumante, 1.5 %V</li> </ul>	PLANTA DE LODOS												
2	Instalar la unidad de Nitrógeno y unidades de bombeo. De acuerdo con el diagrama que se anexa.	3.0 horas												
3	Instalar los medidores de presión-temperatura a lo largo de la tubería, a las profundidades: <table style="margin-left: 40px; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><u>Profundidad</u></th> <th style="text-align: left;"><u>Orientación</u></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>730.0 m</td> <td>Espacio anular</td> </tr> <tr> <td>580.0 m</td> <td>Interior de tubería</td> </tr> <tr> <td>430.0 m</td> <td>Espacio anular</td> </tr> <tr> <td>280.0 m</td> <td>Interior de tubería</td> </tr> <tr> <td>130.0 m</td> <td>Espacio anular</td> </tr> </tbody> </table> <p>Bajar tubería de trabajo al fondo (740 m). Instalar equipo de medición de parámetros (presión, Q<sub>G</sub>, Q<sub>Liq</sub>, Densidad) superficiales sobre la línea de inyección.</p>	<u>Profundidad</u>	<u>Orientación</u>	730.0 m	Espacio anular	580.0 m	Interior de tubería	430.0 m	Espacio anular	280.0 m	Interior de tubería	130.0 m	Espacio anular	5.0 horas
<u>Profundidad</u>	<u>Orientación</u>													
730.0 m	Espacio anular													
580.0 m	Interior de tubería													
430.0 m	Espacio anular													
280.0 m	Interior de tubería													
130.0 m	Espacio anular													
<b>PRUEBA A-1</b>														
<b>Contenido de polímero= 0.2 % W</b>														
4	Bombar la siguiente cédula, circular cada etapa durante dos ciclos completos. De la válvula de purga instalada después del generador de espuma y antes de entrar al pozo, tomar una muestra de fluido espumado y medir su densidad de entrada.	3.0 horas												
<b>Calidad</b>	<b>Q<sub>g</sub> (m3/min)</b>	<b>Q<sub>liq.</sub> (gpm)</b>												
55	4.0	170												
60	5.0	170												
70	8.0	170												

80	16.0	170
90	23.0	190
95	21.0	173

<b>PRUEBA A-5</b>		
<i>Contenido de polímero = 1.0 % W</i>		
5	Adicionarle 0.8% W (240 kg) de polímero al fluido base y homogenizarlo.	1 hora
6	Bombear la siguiente cédula, circular cada etapa durante dos ciclos completos. De la válvula de purga instalada después del generador de espuma y antes de entrar al pozo, tomar una muestra de fluido espumado y medir su densidad de entrada.	3.0 horas
<b>Calidad</b>	<b>Qg (m3/min)</b>	<b>Qlíq. (gpm)</b>
55	4.0	170
60	5.0	170
70	8.0	170
80	16.0	170
90	23.0	190
95	21.0	173
7	Sacar tubería a superficie y recuperar sensores de presión.	5.0 horas

De ser posible, estas pruebas se deben repetir por lo menos tres veces con el fin de lograr cierta repetibilidad, o en su defecto poder aplicar un método estadístico para el manejo de datos.

TESIS CON  
FALLA DE ...

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

**CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES**

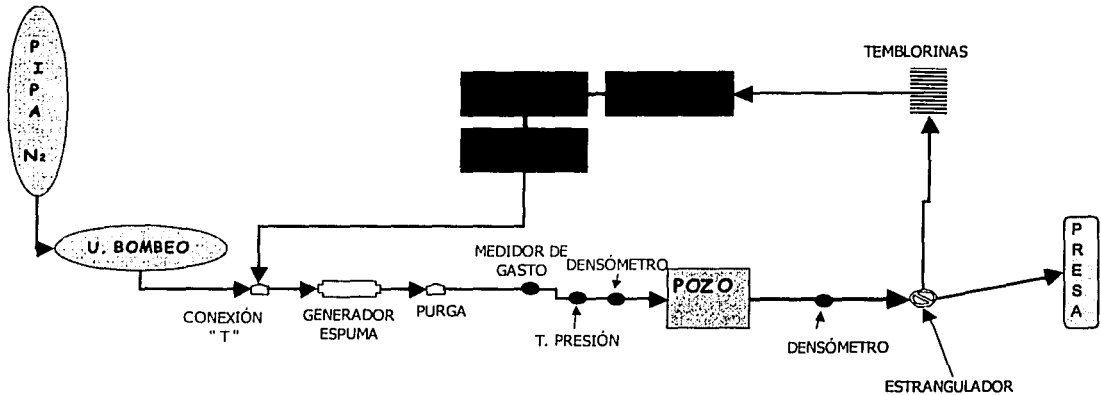
**Primer "Día" de Trabajo.**

PRIMER DÍA DE TRABAJO.

ACTIVIDAD	RESPONSABLE	TIEMPO EFECTIVO EN HORAS																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
Preparación Fluido	Planta de lodos																															
Instalación unidades	Compañía																															
Instalación sensores y bajar sarta	Cuadrilla-Compañía																															
<b>PRUEBA A. INICIA CÉDULA DE BOMBEO.</b>																																
A-1	TESISTAS																															
A-2	TESISTAS																															
A-3	TESISTAS																															
A-4	TESISTAS																															
A-5	TESISTAS																															
Sacar tubería de trabajo/Rec. Sensores	Cuadrilla-Compañía																															
<b>PRUEBA B. VIDA MEDIA DE ESPUMA.</b>																																
40 Muestras de 100 ml (lodo limpio)	TESISTAS/COLABORADOR																															
18 Muestras de 250 ml (contaminado con aceite)	TESISTAS/COLABORADOR																															
18 Muestras de 100 ml (contaminado con salmuera 1)	TESISTAS/COLABORADOR																															
18 Muestras de 100 ml (contaminado con salmuera 2)	TESISTAS/COLABORADOR																															

**DIAGRAMA DE INSTALACIÓN**

**DIAGRAMA DE INSTALACIÓN DEL EQUIPO.**



## CAPÍTULO III

## CAPÍTULO 3.

### INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

En muchas aplicaciones en la industria petrolera, se usan fluidos complejos que exhiben resbalamiento en las fronteras de los cuerpos sólidos. Fluidos tales como gelificantes para fracturamientos, cementos, emulsiones concentradas, suspensiones de arcillas y ahora fluidos espumados para perforar pozos petroleros. El resbalamiento confunde las mediciones reológicas de la viscosidad del fluido y requiere técnicas especiales para separar el efecto del resbalamiento de la del flujo del fluido. Las técnicas tradicionales de corrección para el resbalamiento en geometrías de capilar y Couette fueron desarrolladas por Money<sup>1</sup> en 1931, sin embargo el documento original no es fácilmente accesible. En el presente trabajo se presenta un procedimiento metodológico de cálculo que combina dos investigaciones interesantes sobre el tema. Una de ellas es la desarrollada por P. Mitschka en 1982, acerca de el procedimiento de conversión de la función viscosidad para el caso del modelo Brookfield R.V.T. específicamente cuando se usan paletas de discos<sup>2</sup>. La segunda es el trabajo desarrollado por Ann S. Yoshimura acerca de mediciones de viscosidad de espumas con geometrías de capilares, platos paralelos y Couette<sup>3</sup>. El propósito de este trabajo de investigación es resumir las técnicas existentes para el análisis de mediciones reológicas de fluidos complejos, como es el caso de una espuma y trasladarlo a resultados accesibles a los ingenieros que tienen que ver cotidianamente con los problemas que implica el uso de estos fluidos en la industria petrolera.

---

<sup>1</sup> Mooney, M.: J. Rheology (1931) 2, 210.

<sup>2</sup> P. Mitschka, "Simple conversion of Brookfield R.V.T. readings into viscosity functions"; Rheol. Acta 21, 207-209 (1982), Institute of Chemical Process Fundamentals, Czechoslovak Academy of Sciences, Prague.

<sup>3</sup> Khan, Saad A.; "Foams, Theory, Measurements and Applications"



### 3.1. VISCOSÍMETRO CAPILAR.

---

Los datos de medición relacionados a las propiedades viscosas, después de aplicar las correcciones apropiadas son:

Velocidad promedio del fluido:

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \dots (1)$$

donde: Q, ritmo de flujo volumétrico.

D, diámetro interior del capilar.

L, longitud efectiva del capilar.

Haciendo un balance simple de fuerzas en estado permanente tenemos lo siguiente:

$$\frac{\pi D^2}{4} \Delta P = \pi D L \tau_w \dots (2)$$

o

$$\tau_w = \frac{D \Delta P}{4L} \dots (3)$$

donde:  $\tau_w$ , es el esfuerzo de corte en la pared del capilar.

$\Delta P$ , caída de presión debida a la fricción laminar.

La velocidad de corte en la pared del capilar puede ser determinada de la ecuación general de Rabinowitsch (1929) y Money (1931), la cual es:

$$\dot{\gamma}_w = \left( \frac{1 + 3n'}{4n'} \right) \frac{8V}{D} \dots (4)$$

donde:

$$n' = \frac{d \ln \left( \frac{D\Delta P}{4L} \right)}{d \ln \left( \frac{8V}{D} \right)} \dots (5)$$

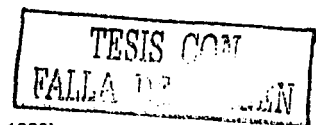
es la pendiente de la gráfica logarítmica  $D\Delta P/4L$  vs.  $8V/D$ . La pendiente  $n'$ , puede variar y el valor aplicable debe ser usado para cada valor de  $8V/D$ . Para fluidos Newtonianos  $n'=1$ .

Procedimiento:

- a. Calcular  $\tau_w$  de los datos después de corregirlos, aplicando la ecuación (3).
- b. Graficar  $\tau_w$  vs.  $8V/D$  con coordenadas logarítmicas y determinar  $n'$  como una función de  $8V/D$ .
- c. Calcular  $\gamma_w$  de la ecuación (4).
- d. Graficar  $\tau_w$  vs  $\gamma_w$  en coordenadas aritméticas o logarítmicas como se prefiera.
- e. Si se desea, ajustar una de las ecuaciones constitutivas a los datos.

**3.2. VISCOSÍMETRO CON GEOMETRÍA DE DISCOS.**

En el libro de Walters<sup>4</sup>, sobre aplicaciones de geometría en aplicaciones industriales, establece que el "aparato Brookfield es muy fácil de usar, sin embargo la interpretación de los resultados experimentales en términos de datos de funciones de viscosidad ( $\eta, q$ ) está muy lejos de ser en forma directa". De tal manera que Mitshka propone un procedimiento con base en los estudios teóricos de flujo rotacional en materiales complejos reológicamente alrededor de cuerpos con geometrías simples en configuraciones viscométricas básicas.



<sup>4</sup> Walters, K. (ed), "Rheometry: Industrial Applications" (Research Studies Press, Chichester 1980).

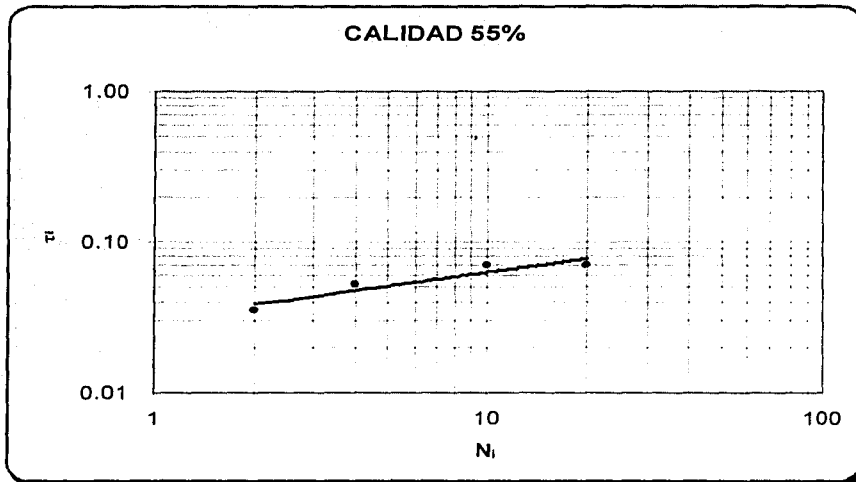
Procedimiento:

1. Se toman por lo menos un par de lecturas en el torque del dial del viscosímetro (cuya escala varía de 1-100),  $\alpha$ .
2. Los valores de  $\alpha_i$  promediados se convierten a esfuerzos de corte  $\tau_i$  (Pa) para el número de paleta de disco específico usando la siguiente expresión:

$$\tau_i = k_{\alpha\tau} \alpha_i \dots (6)$$

donde el valor de  $k_{\alpha\tau}$ <sup>5</sup> se presenta en la tabla 1.

3. Graficar en escala log-log  $N_i$  vs.  $\tau_i$  para cada geometría, donde  $N_i$  es la velocidad de rotación del viscosímetro, [rpm].

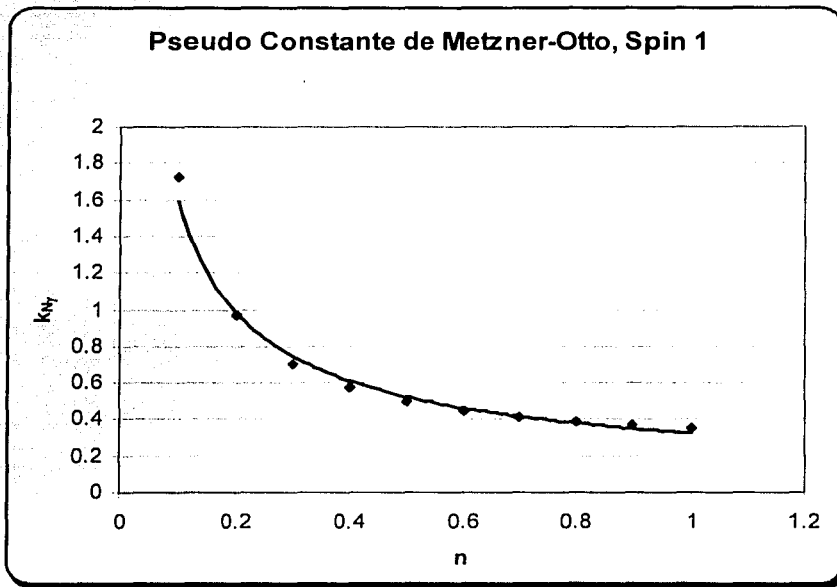


<sup>5</sup> Los factores de conversión  $k_{\alpha\tau}$  y  $k_{N\tau}$  que aparecen en este procedimiento son resumidos en la tabla No. 1 para las paletas de discos del viscosímetro Brookfield modelo RVT. Estas constantes son descritas con mayores argumentos en las siguientes monografías:

- Wein, O., P. Mitschka, K. Wichterle, "Rotational Flows of Non-Newtonian Liquids". Published (in Czech) as Studie No. 5 by Academia, Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences (Prague 1981).
- Wein, O., P. Mitschka, K. Wichterle, Immersional rotational viscometry. A course manual, published (in Czech) in Edice MACRON N-1 by the Institute of Macromolecular Chemistry, Czechoslovak Academy of Sciences (Prague 1977).

**FIG. 3.2.1. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE ROTACIÓN  $N$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE  $n$ .**

4. Cuando los punto graficados se alinean a una línea recta, el fluido que se está probando es del tipo de Ley de potencias. La pendiente de esta gráfica es entonces, igual al índice de comportamiento de flujo del fluido,  $n$ .
5. De acuerdo al valor del índice de comportamiento de flujo,  $n$ , se obtiene el valor de la pseudo-constante de Metzner -que se proporcionan en la tabla no. 1-,  $k_N(n)$ .



**FIG. 3.2.2. PSEUDO-CONSTANTE DE METZNER-OTTO**, para una paleta de disco 1 de un viscosímetro BROOKFIELD modelo RVT, en función del valor del índice de comportamiento de flujo  $n$ , para un fluido complejo como es la ESPUMA.

6. Así podemos calcular la velocidad de corte del fluido debida al flujo,  $\gamma_1$  ( $\text{seg}^{-1}$ ), con la siguiente expresión:

$$\gamma_i = k_{Ny}(n)N_i \dots (7)$$

7. Cuando no es posible aproximar la curva obtenida en la gráfica log-log a una línea recta, se dibuja una línea punteada uniendo los puntos. De la pendiente de tales curvas en cada punto, correspondiente a la velocidad de rotación usada para cada paleta de disco en particular, los valores locales del índice de flujo aparente  $n_i^* = n_i^*(N_i)$  se determinan con:

$$n_i^* = d(\log \tau) / d(\log N) \Big|_{N=N_i} \dots (8)$$

8. Se grafica entonces, esfuerzo de corte  $\tau$  contra la velocidad de corte,  $\gamma$  en un plano cartesiano, Si las dos curvas no coinciden, es debido a la presencia del efecto de resbalamiento durante la medición reológica. Así se procede a corregir la velocidad con la siguiente expresión:

$$\Omega_{F'} = \frac{R_{b2}\Omega_2 - R_{b1}\Omega_1}{R_{b2} - R_{b1}} \dots (9)$$

donde  $\Omega_{F'}$ ,  $\Omega_{1,2}$  puede estar en rad/seg,  $\text{seg}^{-1}$ . Los subíndices 1 y 2 se refieren a las geometrías utilizadas. De esta manera tenemos ya la velocidad de corte o angular corregida por resbalamiento, con lo que se procede a obtener el esfuerzo de corte igualmente corregido y se grafica nuevamente.

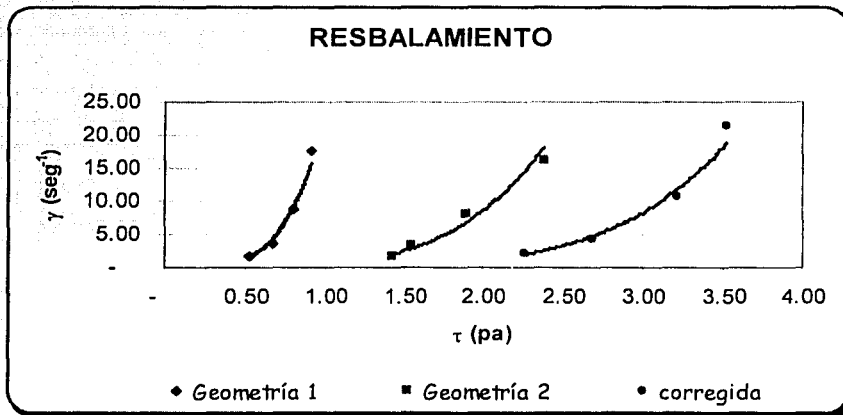
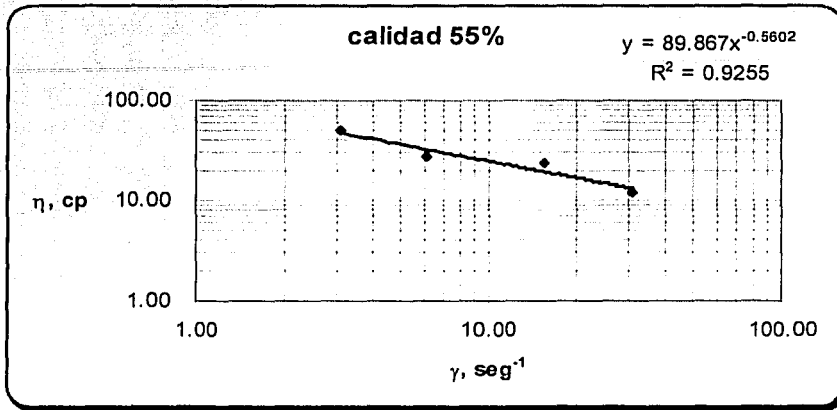


FIG. 3.2.3. GRÁFICA DE ESFUERZO DE CORTE  $\tau$ , vs. VELOCIDAD DE CORTE,  $\gamma$ , QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO.

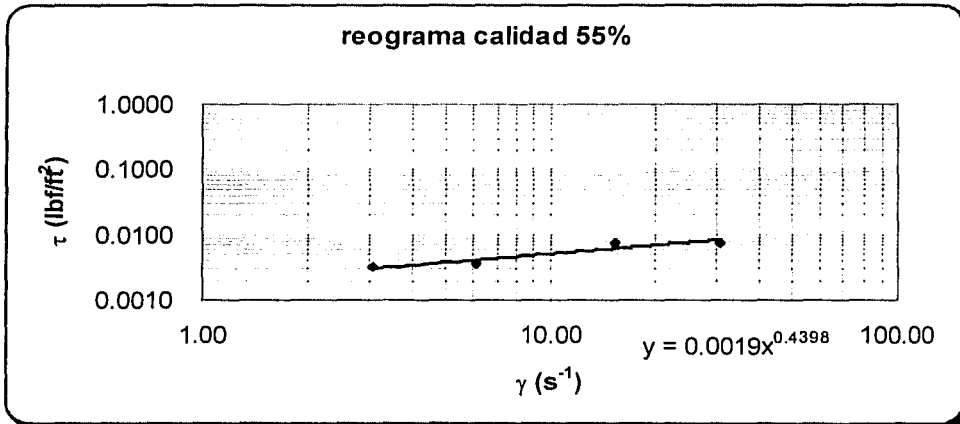
9. Los pares de puntos significativos de  $\tau_i - \gamma_i$ , son asumidos como puntos de la función de viscosidad del fluido muestreado.

$$\eta = \tau / \gamma \dots (9)$$

obteniendo finalmente los reogramas buscados.



**FIG. 3.2.4.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE LA ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL CASO DE UNA ESPUMA CALIDAD 55%.



**FIG. 3.2.5.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%.

**TABLA No. 1. Factores de Conversión para las paletas del viscosímetro Brookfield R.V.T. (bajo condiciones de medición estándar).**

Número de paleta	1	2	3	4	5	6	7	
$k_{ut}$	0.035	0.119	0.279	0.539	1.05	2.35	8.4	
$k_{Ny}$	$n = 0.1$	1.728	1.431	1.457	1.492	1.544	1.366	1.936
	0.2	0.967	0.875	0.882	0.892	0.907	0.851	1.007
	0.3	0.705	0.656	0.656	0.658	0.663	0.629	0.681
	0.4	0.576	0.535	0.530	0.529	0.528	0.503	0.515
	0.5	0.499	0.458	0.449	0.445	0.442	0.421	0.413
	0.6	0.449	0.404	0.392	0.387	0.382	0.363	0.346
	0.7	0.414	0.365	0.350	0.343	0.338	0.320	0.297
	0.8	0.387	0.334	0.317	0.310	0.304	0.286	0.261
	0.9	0.367	0.310	0.291	0.283	0.276	0.260	0.232
	1.0	0.351	0.291	0.270	0.262	0.254	0.238	0.209

### 3.3. VISCOSÍMETRO DE CONO Y PLATO.

Los datos requeridos son:

$D=2R$ , diámetro del plato estacionario.

$\phi$ , ángulo entre el cono y el plato.

$N$ , velocidad rotacional del cono,  $\text{seg}^{-1}$ .

$\theta$ , deflexión del resorte siendo una medida del torque en el plato.

La velocidad de corte al radio  $r$  está dada por:

$$\dot{\gamma}_r = \frac{2\pi N}{r \tan \phi} \approx \frac{2\pi N}{\phi} \dots (10)$$

ya que para ángulos pequeños  $\tan \phi \approx \phi$ , para el rango de ángulos del cono empleado, la velocidad de corte es esencialmente independiente de  $r$ , es decir, es constante a través del fluido.

Si  $T=k\theta$  es el torque (donde  $k$  es la constante del resorte), entonces a partir de un balance de fuerzas, y debido a que  $\tau$  es constante bajo la velocidad de corte constante, tenemos:

$$T = 2\pi r \int_0^R r^2 dr \dots (11)$$

de donde:

$$\tau = \frac{3k\theta}{2\pi R^3} \dots (12)$$

Procedimiento:

- a. Calcular  $\tau$  a partir de la deflexión, y la constante del resorte usando la ecuación (12).
- b. Calcular  $\dot{\gamma}_r$  a partir de la velocidad del cono y la ecuación (10).
- c. Graficar  $\tau$  vs  $\dot{\gamma}_r$  en coordenadas logarítmicas o aritméticas, como prefiera.
- d. Si se desea, ajustar una ecuación constitutiva a los datos.

Una característica especial de las mediciones viscométricas para fluidos No-Newtonianos es la determinación de la existencia de un valor de cedencia y su magnitud. Sin considerar el tipo del instrumento usado, el esfuerzo de corte requerido para iniciar el movimiento del fluido puede ser medido. O bien, los datos de esfuerzo de corte obtenido a varias velocidades de corte bajas pueden ser extrapolados a la velocidad de corte de cero.

Sin embargo, para espumas que contienen una alta fracción de volumen de gas con esfuerzos de cedencia, la distribución de esfuerzos a través de la geometría de medición no será uniforme, es decir, existirán regiones en la espuma que estén por debajo del esfuerzo de cedencia y presentarán un movimiento parecido a un cuerpo rígido, así como habrá otras



regiones donde la espuma fluiría. Por lo que, si el esfuerzo está por debajo del esfuerzo de cedencia en algún punto dentro de la espuma, ésta resbalará en los límites en lugar de fluir y entonces la "viscosidad" medida no reflejará la viscosidad del fluido sino la "fricción de deslizamiento" de la espuma a través de la superficie sólida. Por ello es importante hacer la corrección para contrarrestar el efecto.

Los datos experimentales sobre viscosidad de espumas son relativamente difíciles de obtener debido a la interacción entre la estructura de la espuma, la geometría de medición y la reología. Las técnicas que se han presentado para ello todas tienen presente el efecto de resbalamiento, para el viscosímetro capilar es menos representativo que para los otros dos casos, sin embargo es posible obtener valores ejemplares de viscosidad de espuma.

### **3.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE INTERPRETACIÓN DE DATOS USADO PARA EL FLUIDO BPU.**

---

Se tienen dos tipos de fluidos base, cuya diferencia es la concentración de polímero que contiene. Para el fluido tipo A, se usó una concentración de polímero de 0.2 %, mientras que para el fluido tipo B, se empleó una concentración de polímero de 1.0 %.

Para los dos casos, se varió la concentración de espumante de 1.0%, 1.5% y 2.0%, a continuación presentaremos explícitamente el procedimiento desarrollado para llegar a las familias de curvas de comportamiento de flujo del fluido BPU.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**FLUIDO TIPO "A".**

Espumante = 1.0 %

Calidad,  $\Gamma = 55\%$

**Geometría 1.**

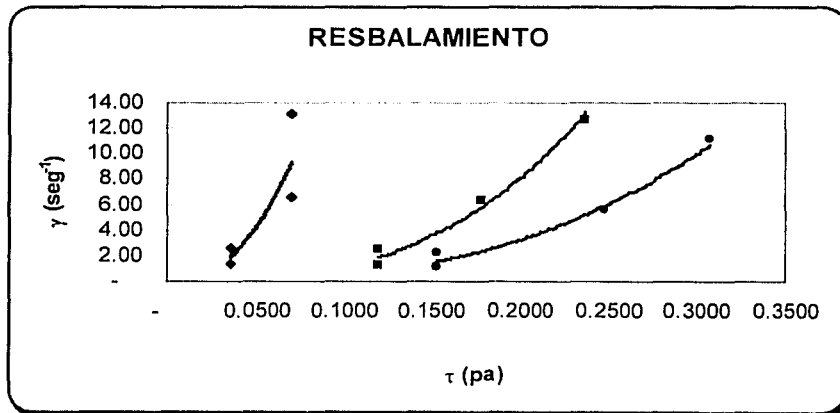
Paleta de disco No. 1  $k_{at} = 0.035$   
 $Rb1 = 1.43 \text{ cm}$   $n = 0.3633$   
 $Rc1 = 2.0 \text{ cm}$   $k_{Ny} = 0.654$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

**Geometría 2.**

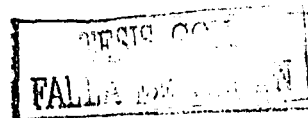
Paleta de disco No. 2  $k_{at} = 0.119$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$   $n = 0.3204$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$   $k_{Ny} = 0.63$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

**TABLA No. 2.** Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 55%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 1.0 %.

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	1	0.0350	1.31	1	0.1190	1.26	1.11	138.30
4	1	0.0350	2.62	1	0.1190	2.52	2.23	69.15
10	2	0.0700	6.54	1.5	0.1785	6.30	5.57	44.63
20	2	0.0700	13.08	2	0.2380	12.60	11.14	27.66



**FIG. 3.4.1.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}} = 1.0\%$



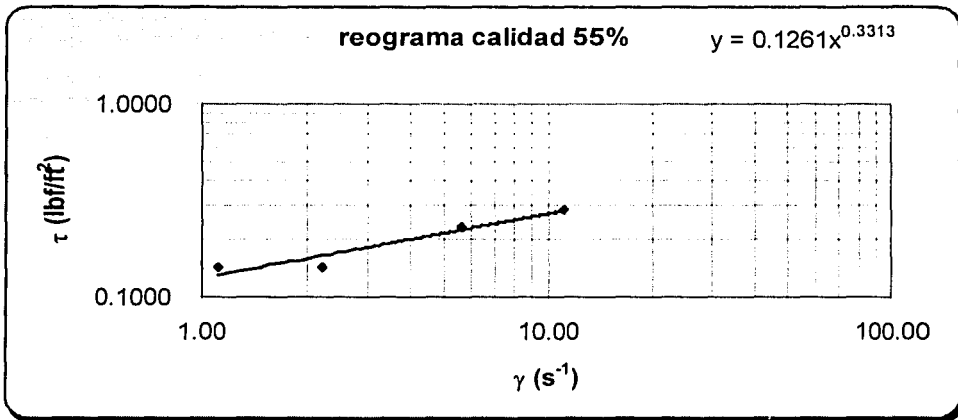


FIG. 3.4.2. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

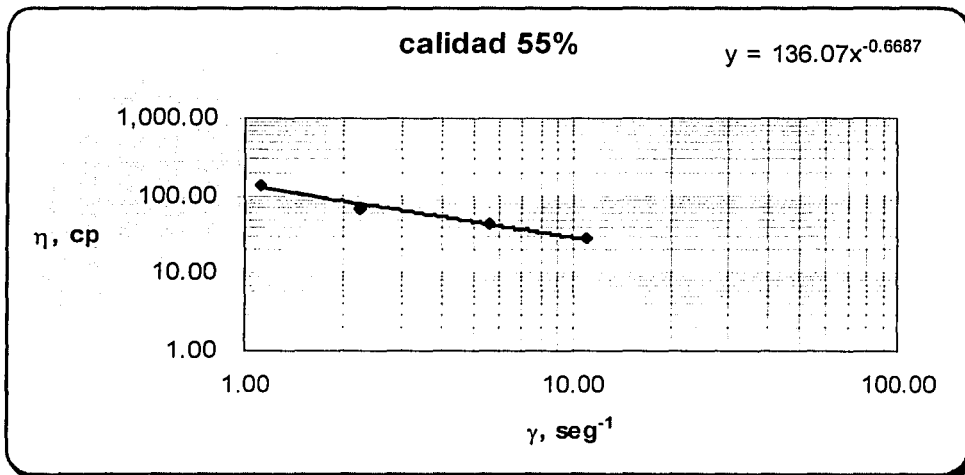


FIG. 3.4.3. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Calidad,  $\Gamma = 60\%$

**Geometría 1.**

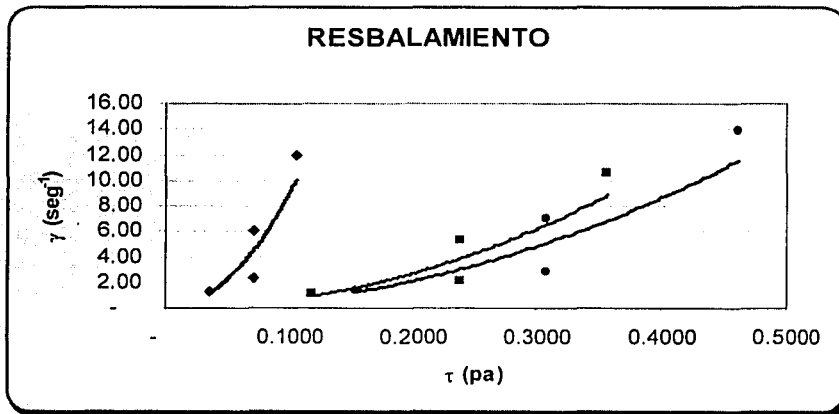
Paleta de disco No. 1  $K_{at} = 0.035$   
 $Rb1 = 1.43 \text{ cm}$   $n = 0.4119$   
 $Rc1 = 2.0 \text{ cm}$   $k_{Ny} = 0.600$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2  $K_{at} = 0.119$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$   $n = 0.4119$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$   $k_{Ny} = 0.529$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

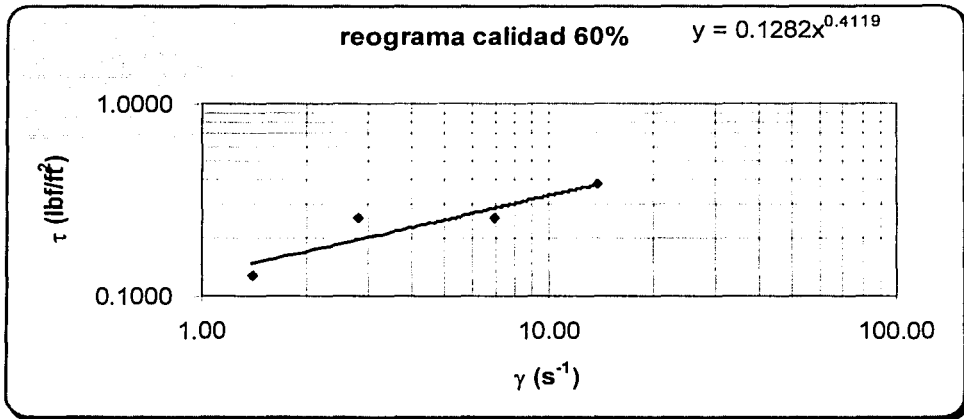
**TABLA No. 3.** Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 60%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{espumante}$ ) de 1.0 %.

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	1	0.0350	1.20	1	0.1190	1.06	1.39	110.55
4	2	0.0700	2.40	2	0.2380	2.12	2.79	110.55
10	2	0.0700	6.00	2	0.2380	5.29	6.97	44.22
20	3	0.1050	12.00	3	0.3570	10.59	13.94	33.16

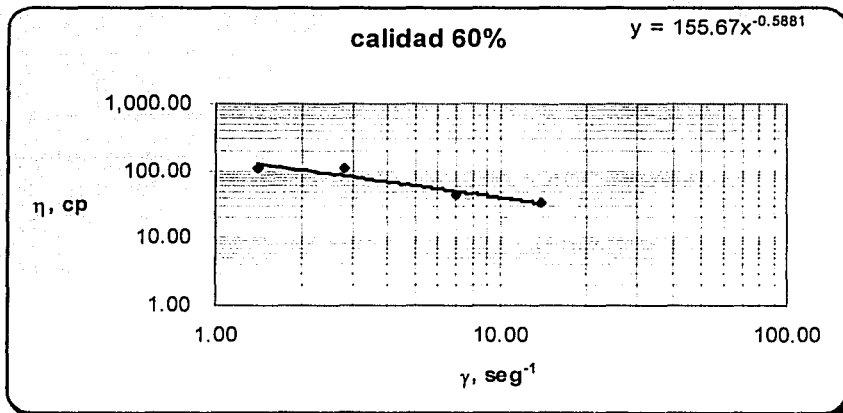


**FIG. 3.4.4.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE} = 1.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FIG. 3.4.5.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$



**FIG. 3.4.6.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Calidad,  $\Gamma = 70\%$

**Geometría 1.**

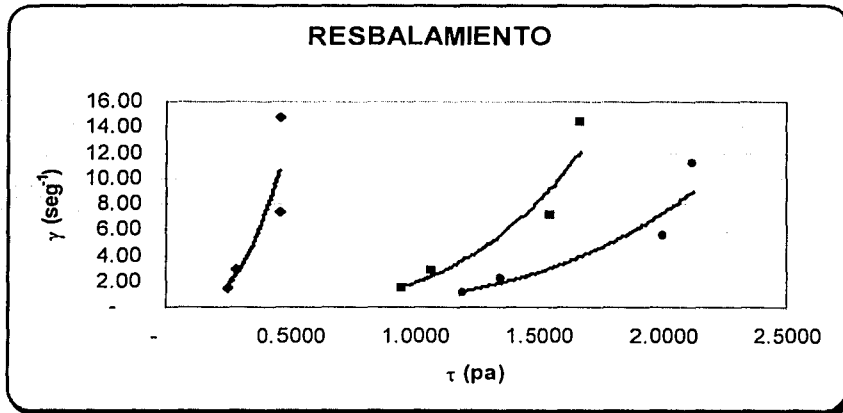
Paleta de disco No. 1  $K_{gr} = 0.035$   
 $Rb1 = 1.43 \text{ cm}$   $n = 0.3945$   
 $Rc1 = 2.0 \text{ cm}$   $k_{Ny} = 0.738$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2  $K_{gr} = 0.119$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$   $n = 0.2647$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$   $k_{Ny} = 0.720$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

**TABLA No. 4.** Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 70%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 1.0 %.

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	7	0.2450	1.48	8	0.9520	1.44	1.12	1,072.84
4	8	0.2800	2.95	9	1.0710	2.88	2.23	605.43
10	13	0.4550	7.38	13	1.5470	7.20	5.58	358.87
20	13	0.4550	14.76	14	1.6660	14.39	11.16	190.10



**FIG. 3.4.7.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}} = 1.0\%$

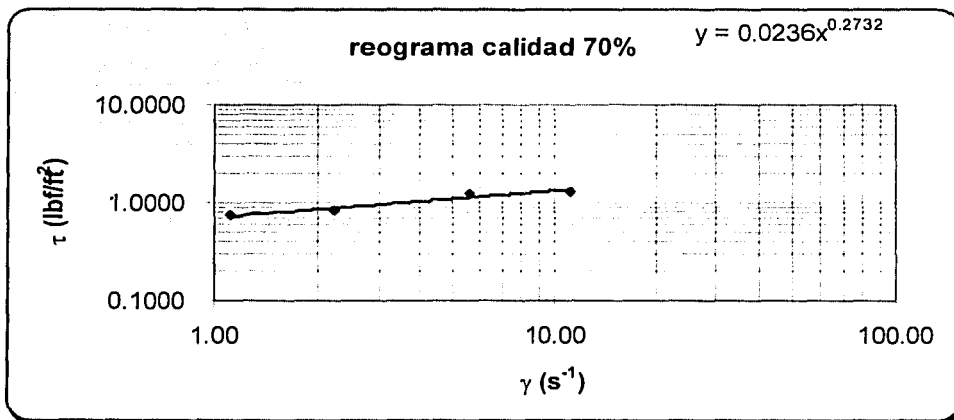


FIG. 3.4.8. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

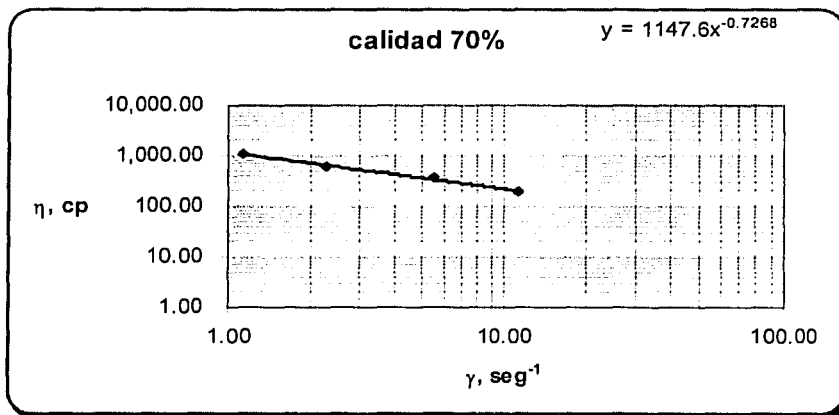


FIG. 3.4.9. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

TESIS CON  
A 17  
EN

Calidad,  $\Gamma = 80\%$

**Geometría 1.**

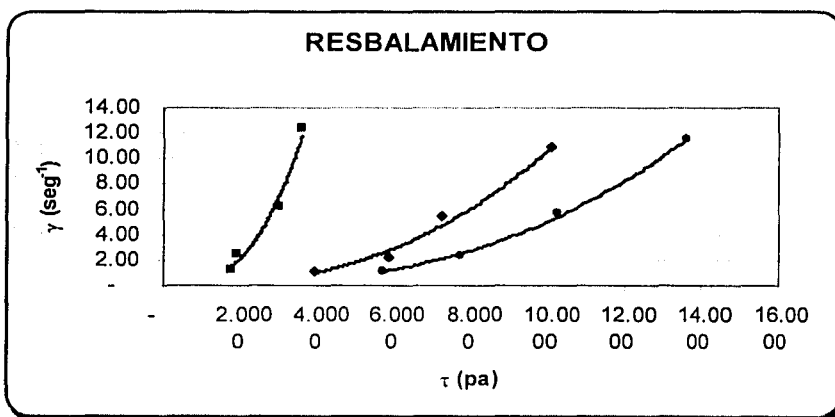
Paleta de disco No. 3  $K_{ut} = 0.279$   
 $\eta = 0.3860$   
 $Rb1 = 0.90 \text{ cm}$   
 $Rc1 = 1.35 \text{ cm}$   
 $K_{Ny} = 0.543$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2  $K_{ut} = 0.119$   
 $\eta = 0.3265$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$   
 $K_{Ny} = 0.622$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

**TABLA No. 5.** Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 80%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 1.0 %.

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	14	3.9060	1.09	15	1.7850	1.24	1.15	4,966.10
4	21	5.8590	2.17	16	1.9040	2.49	2.29	3,387.09
10	26	7.2540	5.43	25	2.9750	6.22	5.73	1,785.21
20	36	10.0440	10.85	30	3.5700	12.44	11.47	1,187.99



**FIG. 3.4.10.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

TESIS 0011  
 1998



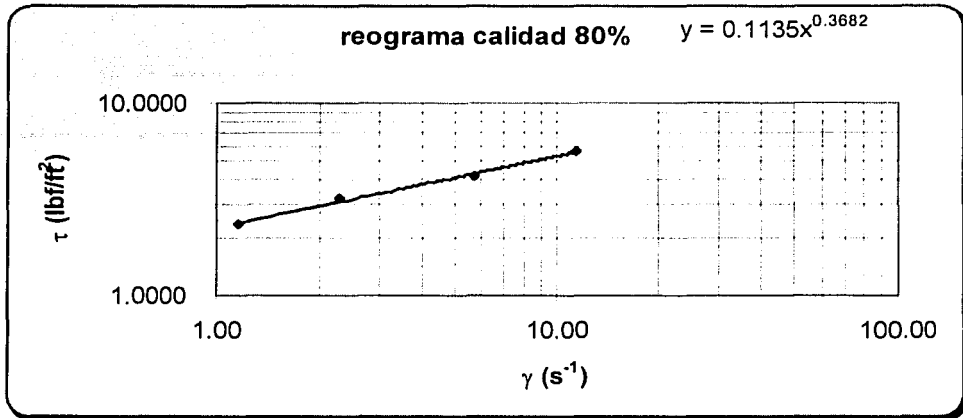


FIG. 3.4.11. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

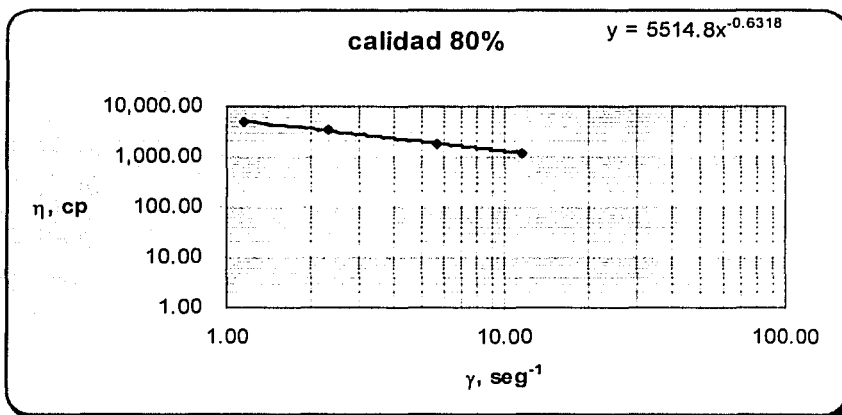


FIG. 3.4.12. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Calidad,  $\Gamma = 90\%$

**Geometría 1.**

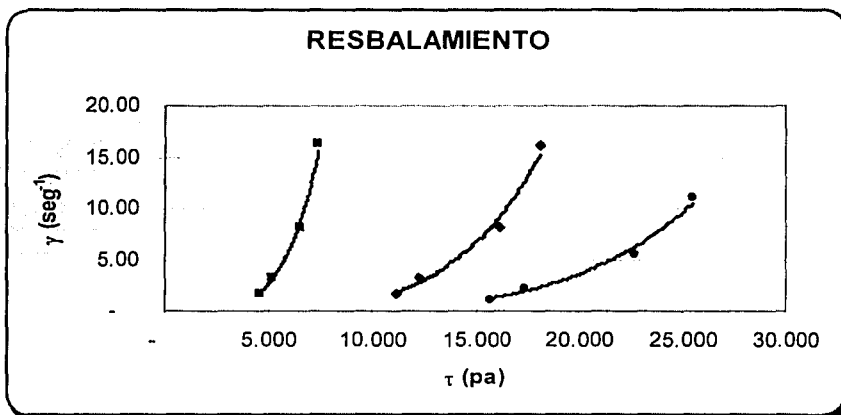
Paleta de disco No. 3      $K_{\alpha\tau} = 0.279$   
 $Rb1 = 0.90 \text{ cm}$       $n = 0.2232$   
 $Rc1 = 1.35 \text{ cm}$       $K_{N\gamma} = 0.811$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2      $K_{\alpha\tau} = 0.119$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$       $n = 0.2203$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$       $K_{N\gamma} = 0.817$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

**TABLA No. 6.** Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 90%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 1.0 %.

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	40	11.160	1.62	38	4.522	1.63	1.11	14,090.00
4	44	12.276	3.25	43	5.117	3.27	2.23	7,813.65
10	58	16.182	8.11	55	6.545	8.17	5.57	4,083.96
20	65	18.135	16.23	62	7.378	16.35	11.14	2,292.30



**FIG. 3.4.13.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}} = 1.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE CALIDAD

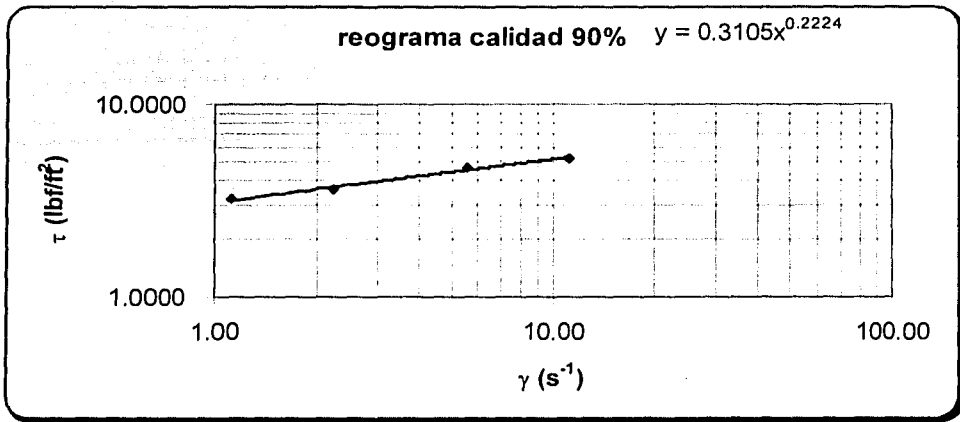


FIG. 3.4.14. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

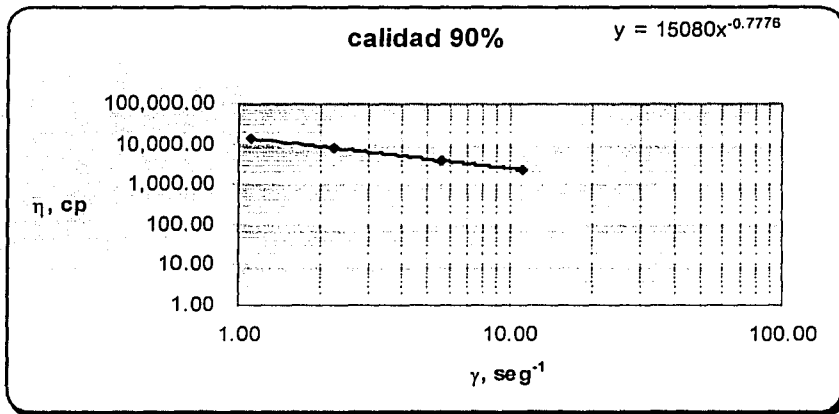


FIG. 3.4.15. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta_i$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Calidad,  $\Gamma = 95\%$

**Geometría 1.**

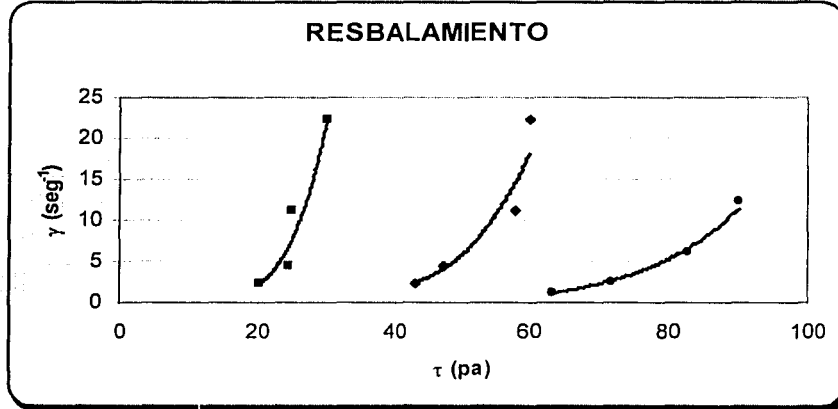
Paleta de disco No. 5       $K_{at} = 1.05$   
 Rb1= 0.55 cm               $n = 0.1535$   
 Rc1=0.99 cm               $k_{Ny} = 1.113$   
 K (Rb/Rc)= 1.8

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 4       $K_{at} = 0.539$   
 Rb1= 0.7 cm               $n = 0.1536$   
 Rc1=1.26 cm               $k_{Ny} = 1.113$   
 K (Rb/Rc)= 1.8

**TABLA No. 7.** *Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 95%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{espumante}$ ) de 1.0 %.*

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	41	43.050	2.23	37.5	20.213	2.23	1.23	51,289.64
4	45	47.250	4.45	45.5	24.525	4.45	2.47	29,095.35
10	55	57.750	11.13	46.5	25.064	11.13	6.17	13,428.10
20	57	59.850	22.27	56	30.184	22.25	12.34	7,299.45



**FIG. 3.4.16.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=1.0\%$

CON  
 VALOR EN PARÉNTESIS

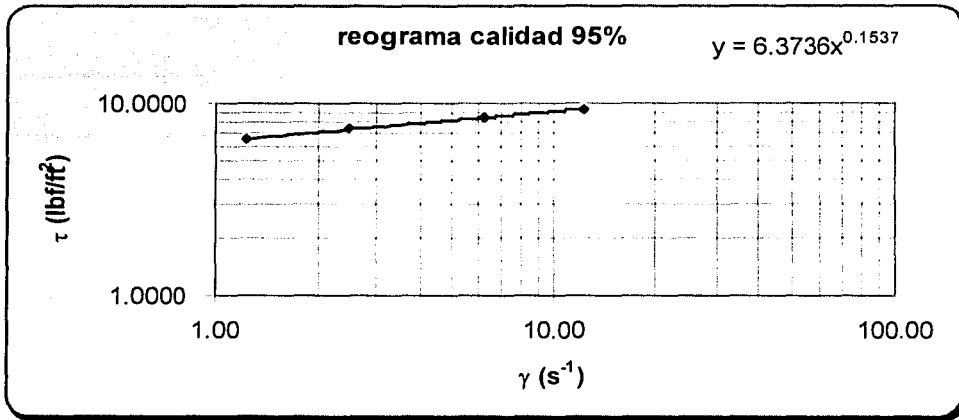


FIG. 3.4.17. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

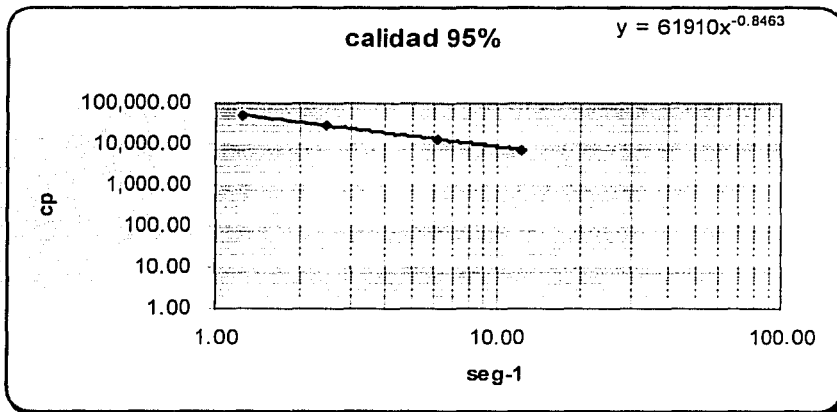


FIG. 3.4.18. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE CINGEN

Espumante = 1.5 %  
 Calidad,  $\Gamma = 55\%$

**Geometría 1.**

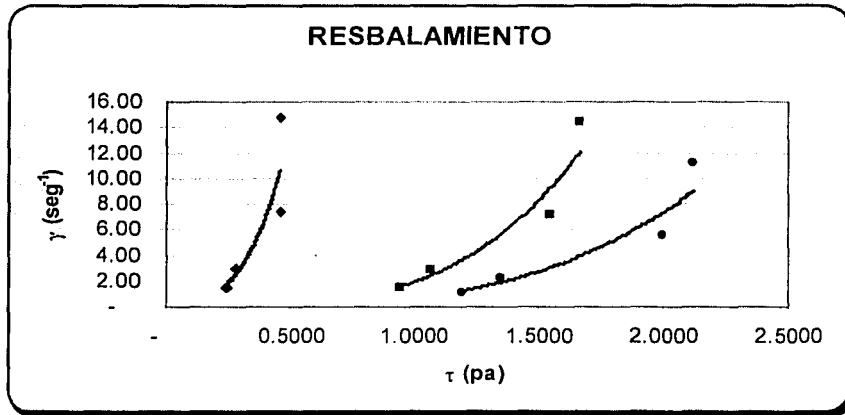
Paleta de disco No. 1      $K_{ut} = 0.035$   
 Rb1= 1.43 cm              $n = 0.3633$   
 Rc1=2.0 cm                 $k_{Ny} = 0.654$   
 K (Rb/Rc)= 1.4

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2      $K_{ut} = 0.119$   
 Rb1= 1.2 cm                 $n = 0.3204$   
 Rc1=1.68 cm                $k_{Ny} = 0.63$   
 K (Rb/Rc)= 1.4

**TABLA No. 8.** *Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 55%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 1.5 %.*

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida	$\eta_i$
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ (seg <sup>-1</sup> )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ (seg <sup>-1</sup> )	(seg <sup>-1</sup> )	Cp
2	1	0.0350	1.31	1	0.1190	1.26	1.11	138.30
4	1	0.0350	2.62	1	0.1190	2.52	2.23	69.15
10	2	0.0700	6.54	1.5	0.1785	6.30	5.57	44.63
20	2	0.0700	13.08	2	0.2380	12.60	11.14	27.66



**FIG. 3.4.19.** *GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$*

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

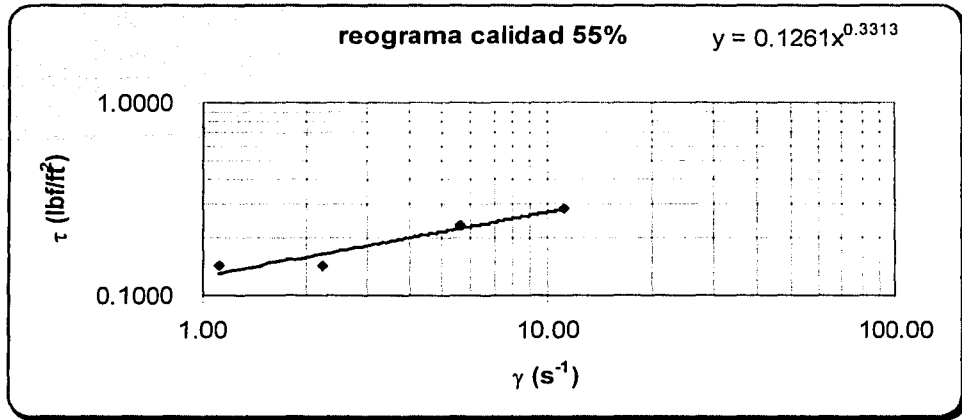


FIG. 3.4.20. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

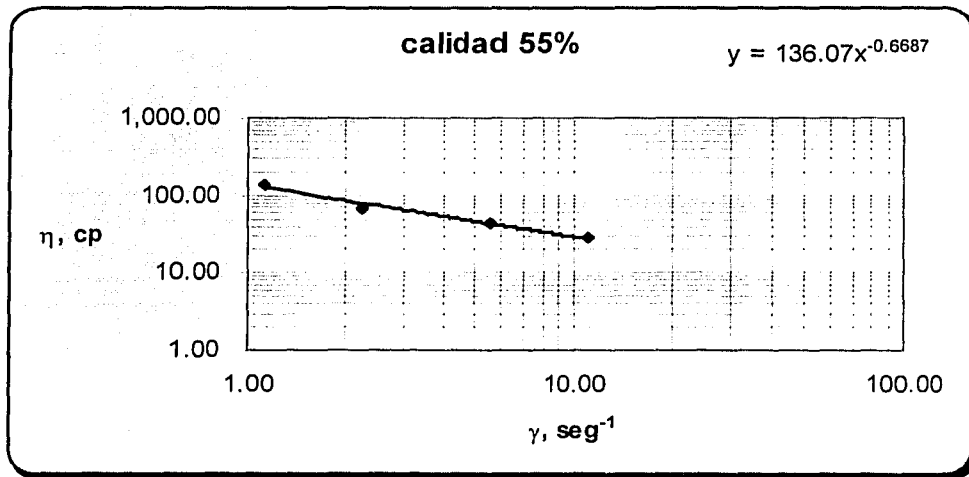


FIG. 3.4.21. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

TESIS CON  
FALTA DE CUBRIR

Calidad,  $\Gamma = 60\%$

**Geometría 1.**

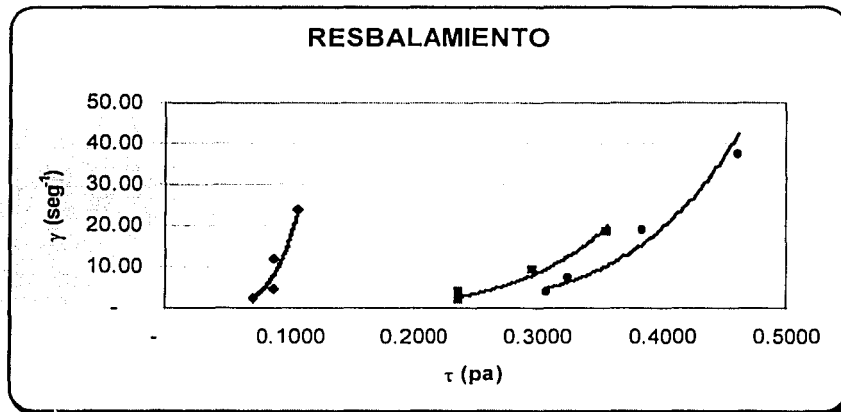
Paleta de disco No. 1  $k_{\alpha\tau} = 0.035$   
 $Rb1 = 1.43 \text{ cm}$   $n = 0.1520$   
 $Rc1 = 2.0 \text{ cm}$   $k_{N\gamma} = 1.190$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2  $K_{\alpha\tau} = 0.119$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$   $n = 0.1853$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$   $k_{N\gamma} = 0.922$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

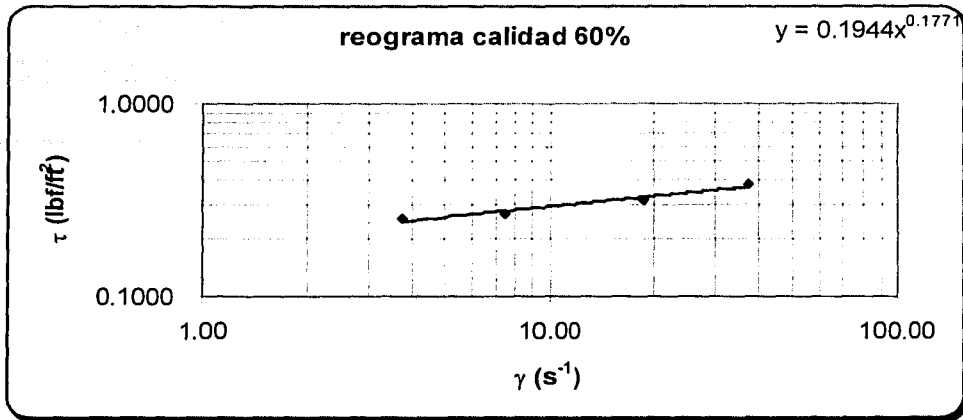
**TABLA No. 9.** Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 60%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 1.5 %.

N <sub>i</sub> (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			γ <sub>i</sub> corregida (seg <sup>-1</sup> )	η <sub>i</sub> Cp
	α <sub>i</sub>	τ <sub>i</sub> (Pa)	γ <sub>i</sub> (seg <sup>-1</sup> )	α <sub>i</sub>	τ <sub>i</sub> (Pa)	γ <sub>i</sub> (seg <sup>-1</sup> )		
2	2	0.0700	2.38	2	0.2380	1.84	3.74	82.37
4	2.5	0.0875	4.76	2	0.2380	3.69	7.48	43.53
10	2.5	0.0875	11.90	2.5	0.2975	9.22	18.70	20.59
20	3	0.1050	23.79	3	0.3570	18.43	37.41	12.36

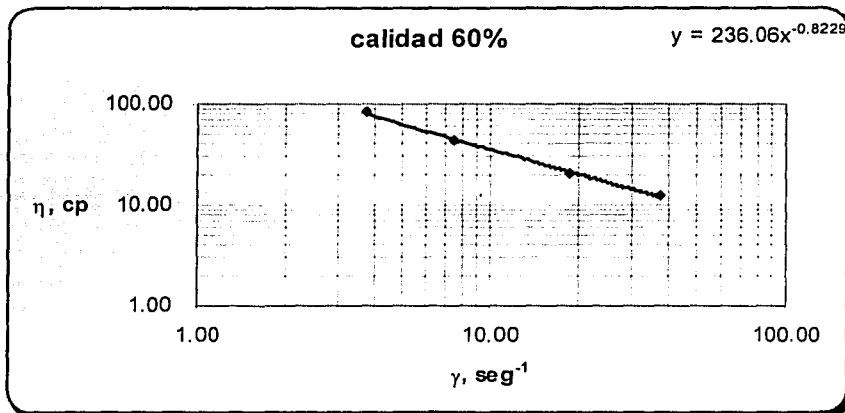


**FIG. 3.4.22.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A";  $C_{\text{ESPUMANTE}} = 1.5\%$





**FIG. 3.4.23.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$



**FIG. 3.4.24.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Calidad,  $\Gamma = 70\%$

**Geometría 1.**

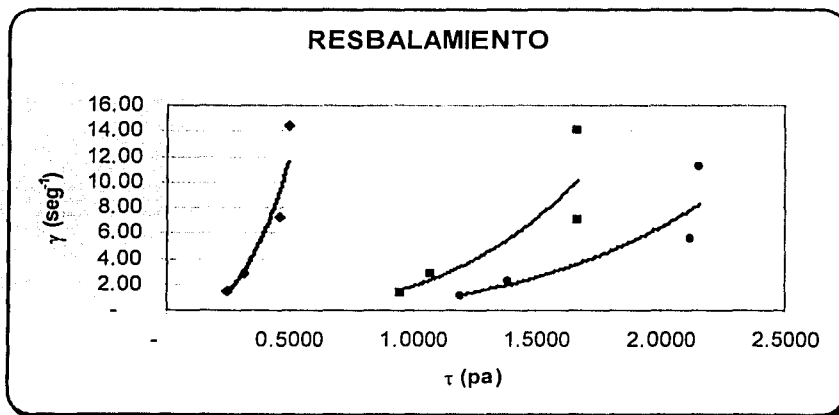
Paleta de disco No. 1  $k_{at} = 0.035$   
 $Rb1 = 1.43 \text{ cm}$   $n = 0.3147$   
 $Rc1 = 2.0 \text{ cm}$   $k_{Ny} = 0.722$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2  $K_{at} = 0.119$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$   $n = 0.2757$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$   $k_{Ny} = 0.699$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

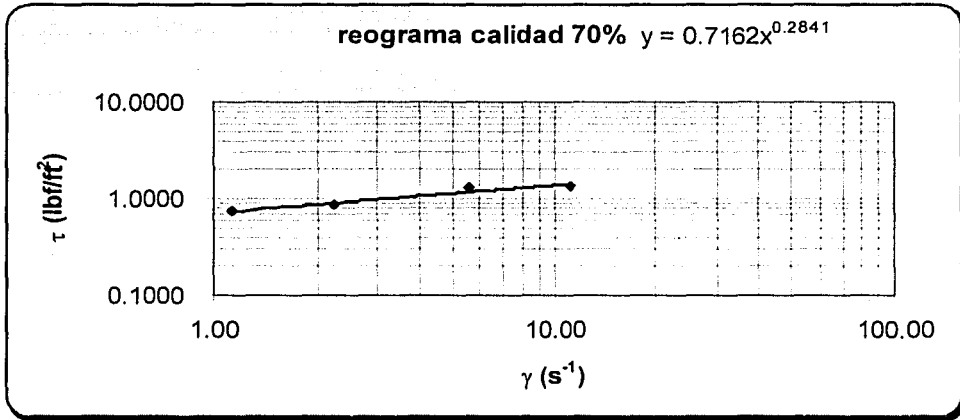
**TABLA No. 10.** Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 70%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 1.5 %.

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	7	0.2450	1.44	8	0.9520	1.44	1.12	1,069.83
4	9	0.3150	2.89	9	1.0710	2.80	2.24	619.38
10	13	0.4550	7.22	14	1.6660	6.99	5.60	379.13
20	14	0.4900	14.43	14	1.6660	13.99	11.19	192.70

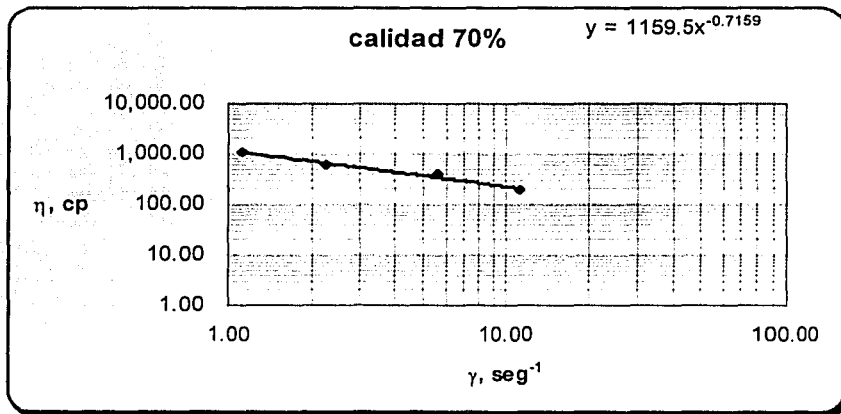


**FIG. 3.4.25.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}} = 1.5\%$

TESIS CON  
FALLA DE COPIADO



**FIG. 3.4.26.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$



**FIG. 3.4.27.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$

TESIS CON  
 FALLA DE ENTREN

Calidad,  $\Gamma = 80\%$

**Geometría 1.**

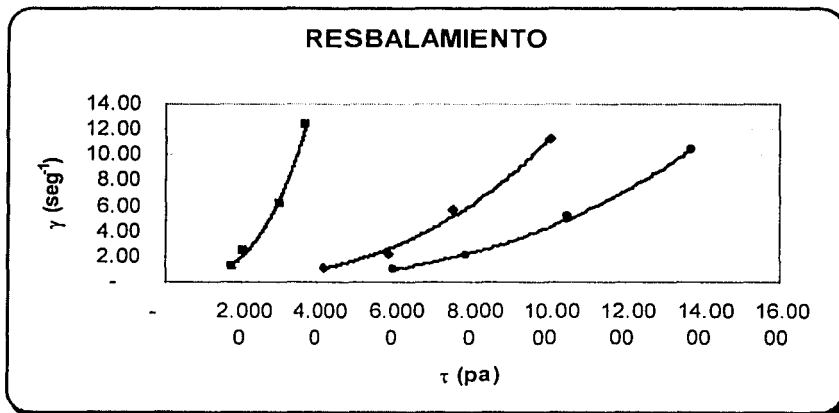
Paleta de disco No. 3  $k_{\alpha\tau} = 0.279$   
 $Rb1 = 0.90 \text{ cm}$   $n = 0.3657$   
 $Rc1 = 1.35 \text{ cm}$   $k_{N\gamma} = 0.565$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2  $K_{\alpha\tau} = 0.119$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$   $n = 0.3297$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$   $k_{N\gamma} = 0.618$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

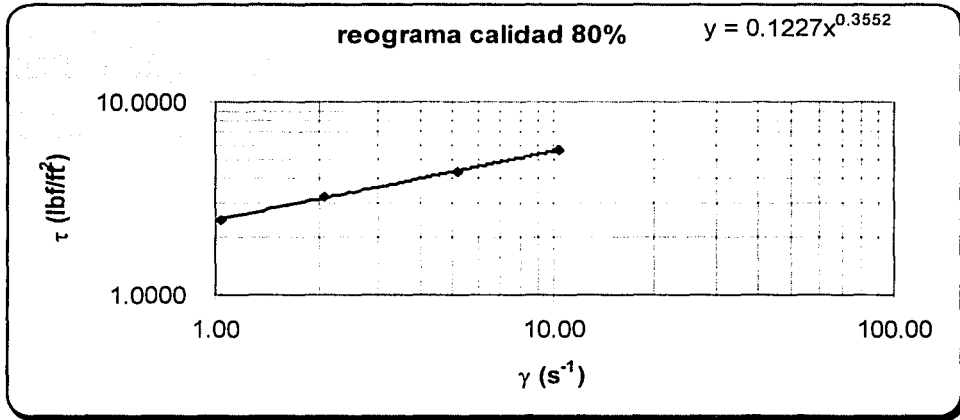
**TABLA No. 11.** *Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 80%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 1.5 %.*

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	15	4.1850	1.13	15	1.7850	1.24	1.04	5,763.84
4	21	5.8590	2.26	17	2.0230	2.47	2.07	3,804.90
10	27	7.5330	5.65	25	2.9750	6.18	5.18	2,029.02
20	36	10.0440	11.29	31	3.6890	12.36	10.36	1,325.88

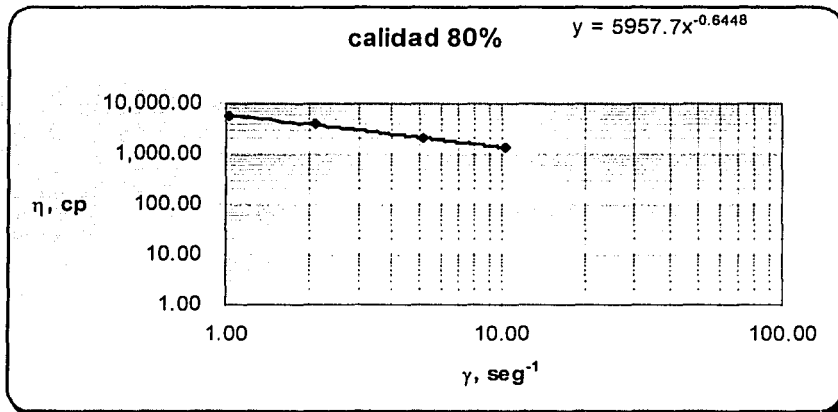


**FIG. 3.4.28.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}} = 1.5\%$

TESIS CON  
FALLA DE CUBRIR



**FIG. 3.4.29.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$



**FIG. 3.4.30.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=1.5\%$

TESIS CON  
FALLA DE CALIDAD

Calidad,  $\Gamma = 90\%$

**Geometría 1.**

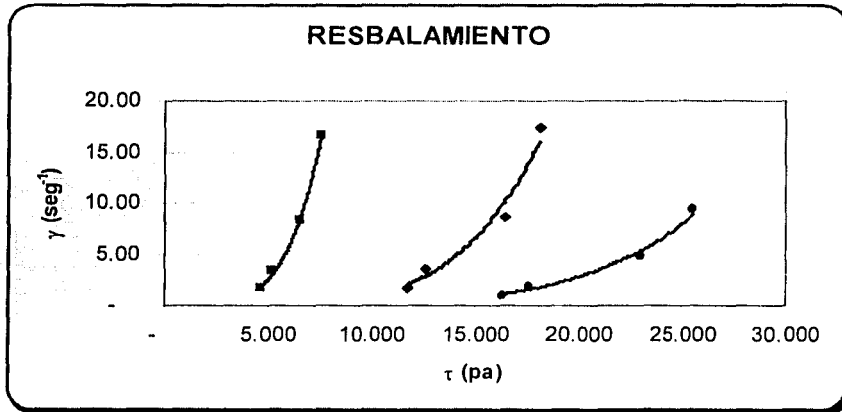
Paleta de disco No. 3      $K_{\alpha\tau} = 0.279$   
 $Rb_1 = 0.90 \text{ cm}$       $n = 0.2041$   
 $Rc_1 = 1.35 \text{ cm}$       $k_{Ny} = 0.867$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2      $K_{\alpha\tau} = 0.119$   
 $Rb_1 = 1.2 \text{ cm}$       $n = 0.2165$   
 $Rc_1 = 1.68 \text{ cm}$       $k_{Ny} = 0.827$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

**TABLA No. 12.** *Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 90%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 1.5 %.*

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	42	11.718	1.73	39	4.641	1.65	0.95	17,299.65
4	45	12.555	3.49	43	5.117	3.31	1.89	9,344.07
10	59	16.461	8.67	55	6.545	8.17	4.73	4,865.77
20	65	18.135	17.33	63	7.497	16.55	9.46	2,710.59



**FIG. 3.4.31.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

TRABAJADO CON  
 FALTA DE CARGEN

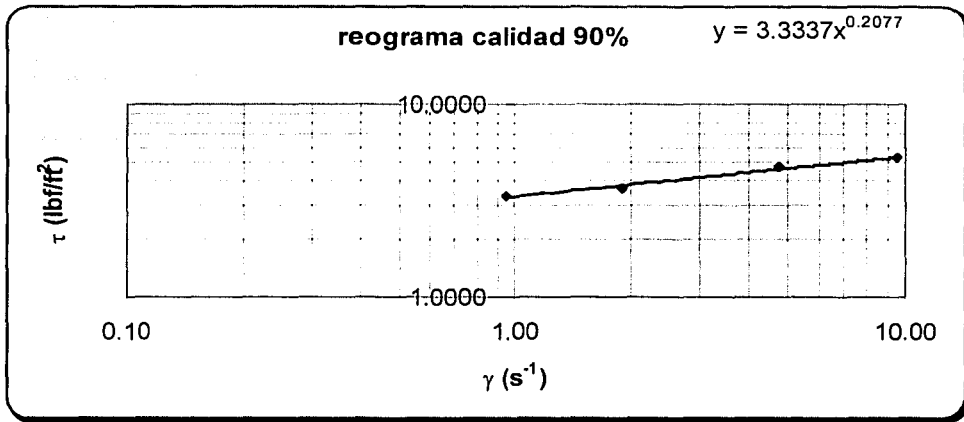


FIG. 3.4.32. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

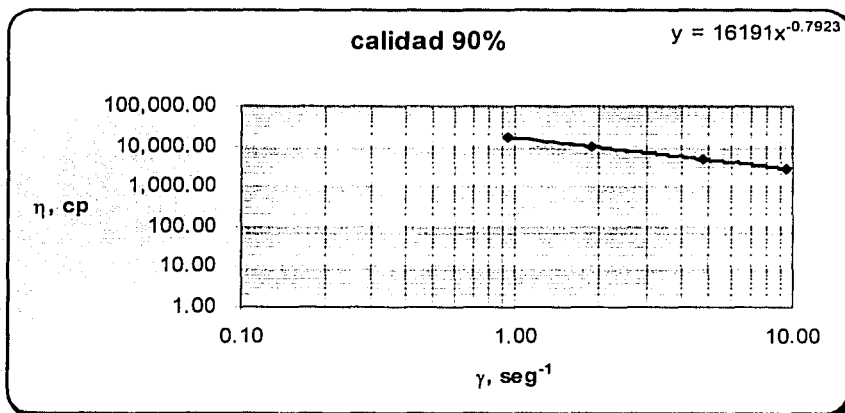


FIG. 3.4.33. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

TESIS CON  
FALLA DE CALIDAD

Calidad,  $\Gamma = 95\%$

**Geometría 1.**

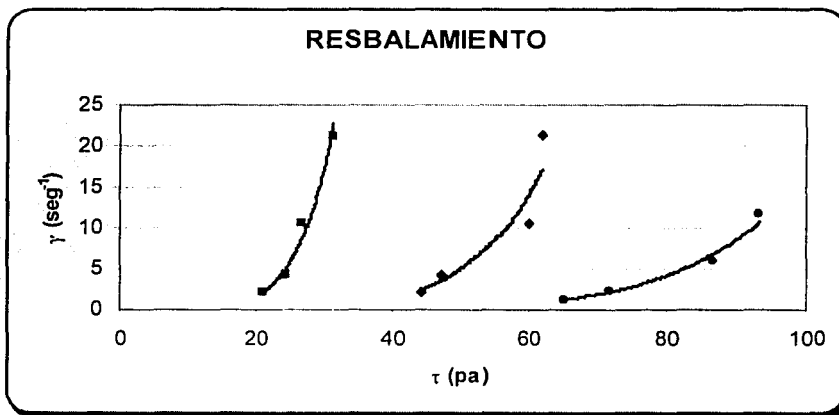
Paleta de disco No. 5  $K_{\alpha 1} = 1.05$   
 $Rb1 = 0.55 \text{ cm}$   $n = 0.1627$   
 $Rc1 = 0.99 \text{ cm}$   $k_{Ny} = 1.064$   
 $K (Rb/Rc) = 1.8$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 4  $K_{\alpha 2} = 0.539$   
 $Rb1 = 0.7 \text{ cm}$   $n = 0.1630$   
 $Rc1 = 1.26 \text{ cm}$   $k_{Ny} = 1.062$   
 $K (Rb/Rc) = 1.8$

**TABLA No. 13.** Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 95%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 1.5 %.

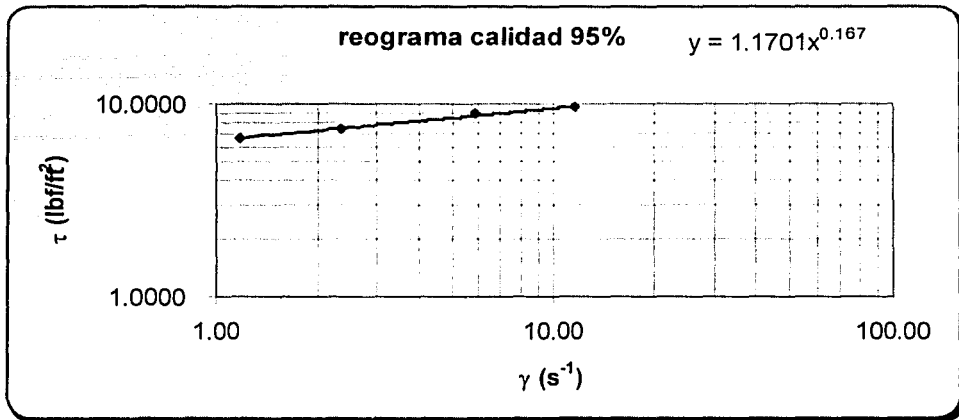
$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	42	44.100	2.13	39	20.021	2.12	1.17	55,509.43
4	45	47.250	4.25	45	24.255	4.25	2.35	30,475.59
10	57	59.850	10.64	49.5	26.681	10.62	5.87	14,751.80
20	59	61.950	21.27	58	31.262	21.24	11.74	7,945.43



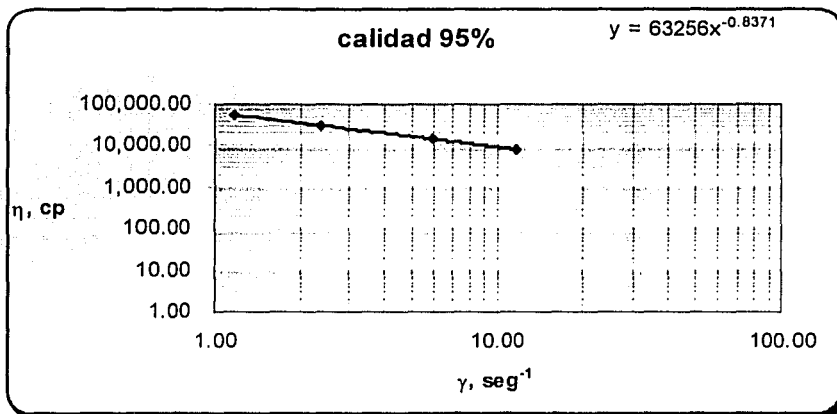
**FIG. 3.4.34.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}} = 1.5\%$

TESIS CON  
FALLA DE CALIFICACION





**FIG. 3.4.35.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$



**FIG. 3.4.36.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Espumante = 2.0 %  
 Calidad,  $\Gamma = 55\%$

**Geometría 1.**

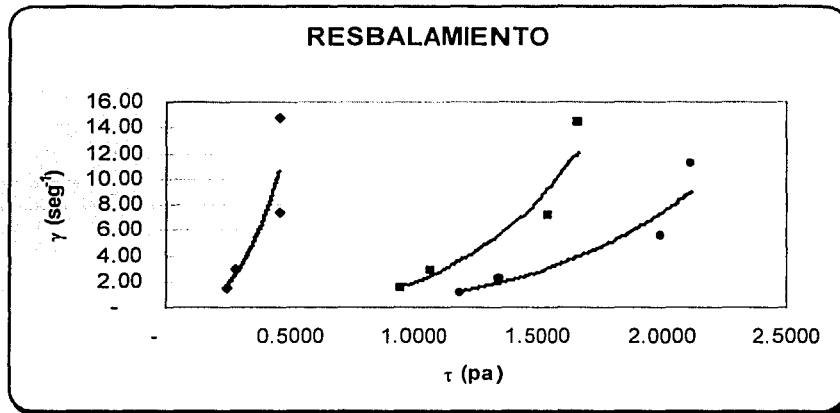
Paleta de disco No. 1  $k_{\alpha 1} = 0.035$   
 $Rb_1 = 1.43 \text{ cm}$   $n = 0.3633$   
 $Rc_1 = 2.0 \text{ cm}$   $k_{N\gamma} = 0.654$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2  $K_{\alpha 2} = 0.119$   
 $Rb_2 = 1.2 \text{ cm}$   $n = 0.3204$   
 $Rc_2 = 1.68 \text{ cm}$   $k_{N\gamma} = 0.63$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

**TABLA No. 14.** *Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 55%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 2.0 %.*

N <sub>i</sub> (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida (seg <sup>-1</sup> )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ (seg <sup>-1</sup> )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ (seg <sup>-1</sup> )		
2	1	0.0350	1.31	1	0.1190	1.26	1.11	138.30
4	1	0.0350	2.62	1	0.1190	2.52	2.23	69.15
10	2	0.0700	6.54	1.5	0.1785	6.30	5.57	44.63
20	2	0.0700	13.08	2	0.2380	12.60	11.14	27.66



**FIG. 3.4.37.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}} = 2.0\%$

Tubo con  
 FALLA DE CALIDAD

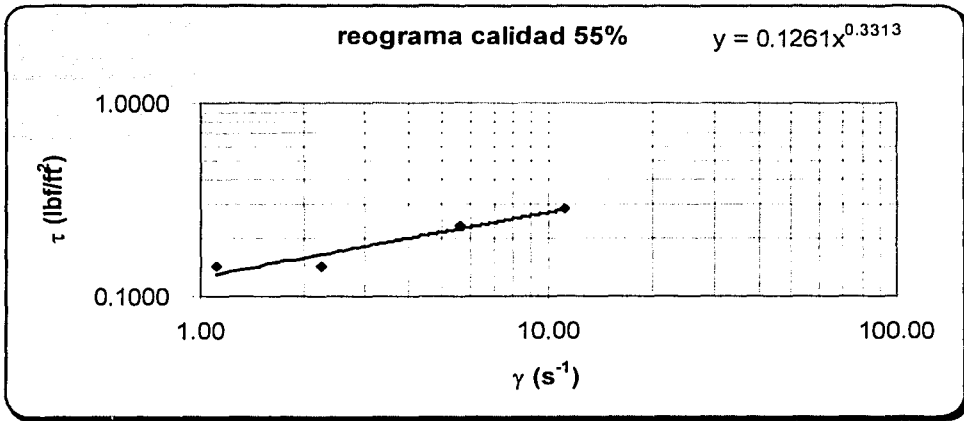


FIG. 3.4.38. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

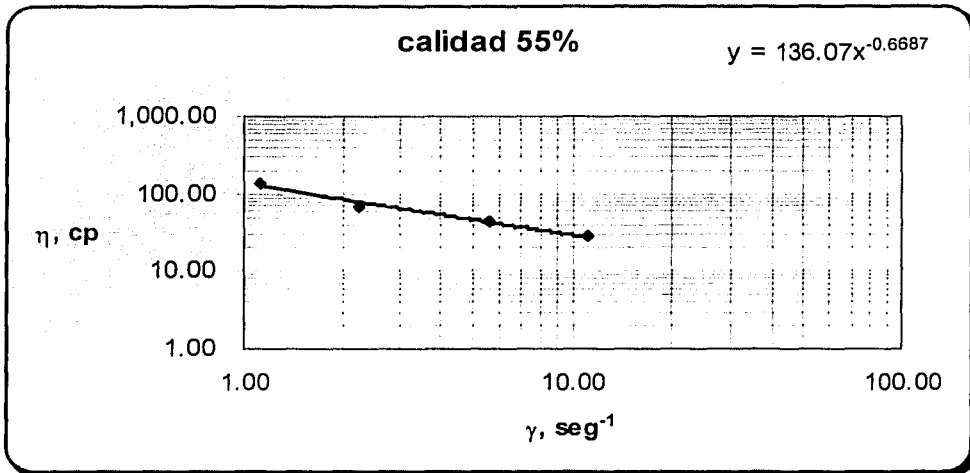


FIG. 3.4.39. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE CALIDAD

Calidad,  $\Gamma = 60\%$

**Geometría 1.**

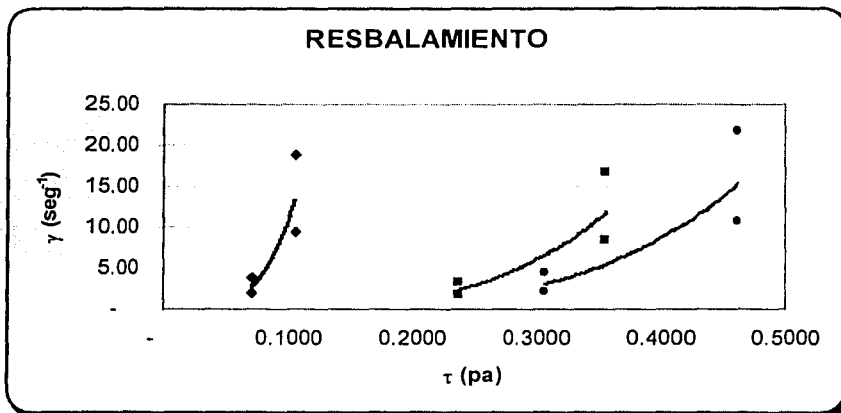
Paleta de disco No. 1      $K_{\alpha\tau} = 0.035$   
 Rb1= 1.43 cm              $n = 0.2125$   
 Rc1=2.0 cm                 $K_{N\gamma} = 0.945$   
 K (Rb/Rc)= 1.4

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2      $K_{\alpha\tau} = 0.119$   
 Rb1= 1.2 cm                 $n = 0.2125$   
 Rc1=1.68 cm                 $K_{N\gamma} = 0.838$   
 K (Rb/Rc)= 1.4

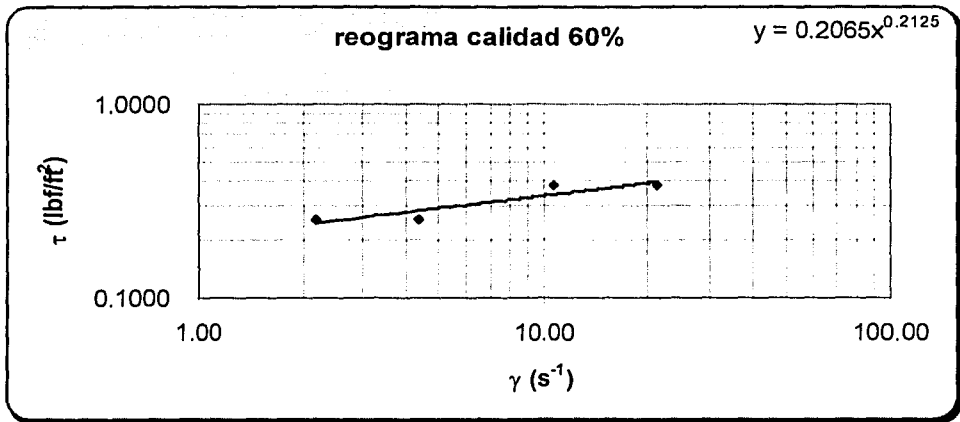
**TABLA No. 15.** Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 60%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 2.0 %.

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	2	0.0700	1.89	2	0.2380	1.68	2.16	142.34
4	2	0.0700	3.78	2	0.2380	3.35	4.33	71.17
10	3	0.1050	9.45	3	0.3570	8.38	10.82	42.70
20	3	0.1050	18.90	3	0.3570	16.76	21.65	21.35

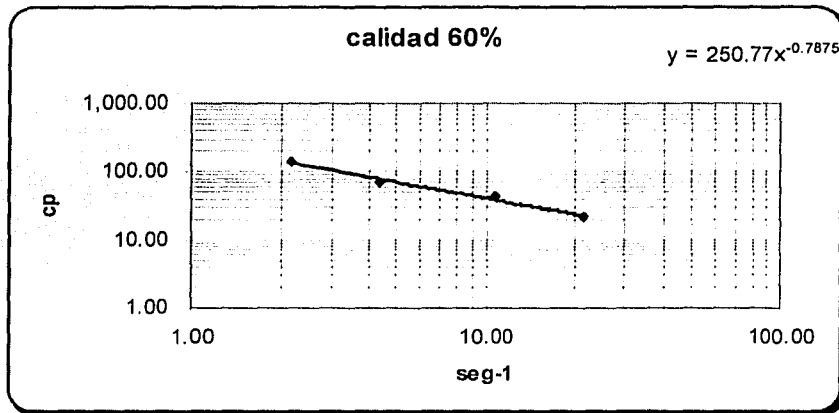


**FIG. 3.4.40.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FIG. 3.4.41.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$



**FIG. 3.4.42.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Calidad,  $\Gamma = 70\%$

**Geometría 1.**

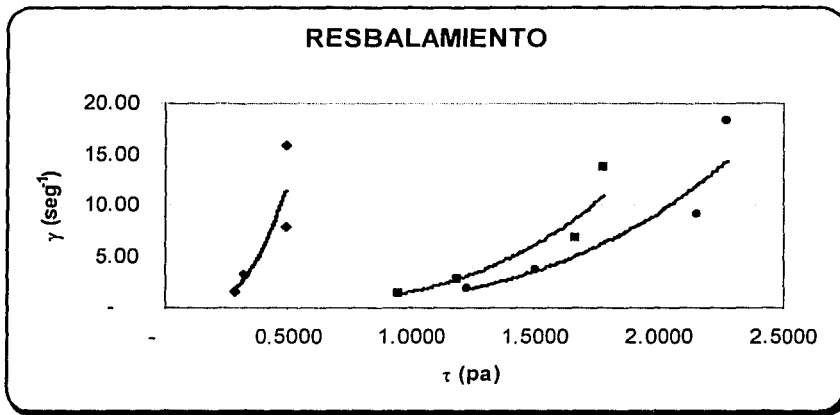
Paleta de disco No. 1  $k_{\alpha\tau} = 0.035$   
 $Rb1 = 1.43 \text{ cm}$   $n = 0.2757$   
 $Rc1 = 2.0 \text{ cm}$   $k_{N\gamma} = 0.790$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2  $K_{\alpha\tau} = 0.119$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$   $n = 0.2859$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$   $k_{N\gamma} = 0.682$   
 $K (Rb/Rc) = 1.4$

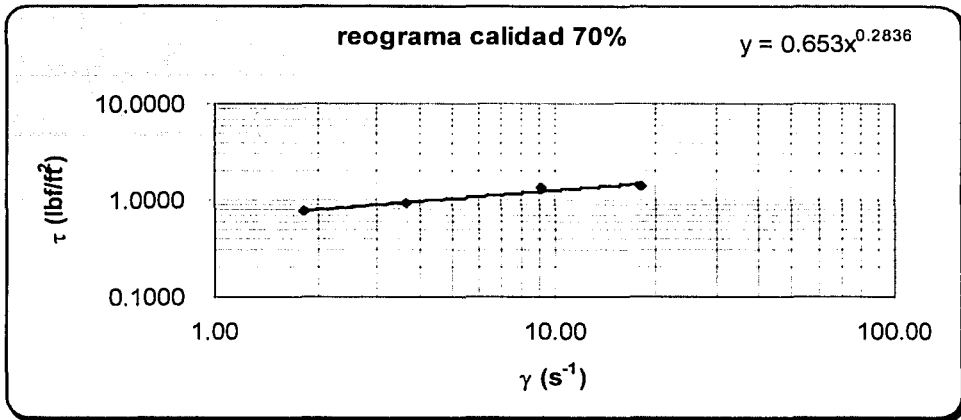
**TABLA No. 16.** *Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 70%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 2.0 %.*

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	8	0.2800	1.58	8	0.9520	1.36	1.82	676.09
4	9	0.3150	3.16	10	1.1900	2.73	3.65	412.95
10	14	0.4900	7.90	14	1.6660	6.82	9.12	236.63
20	14	0.4900	15.81	15	1.7850	13.64	18.23	124.85

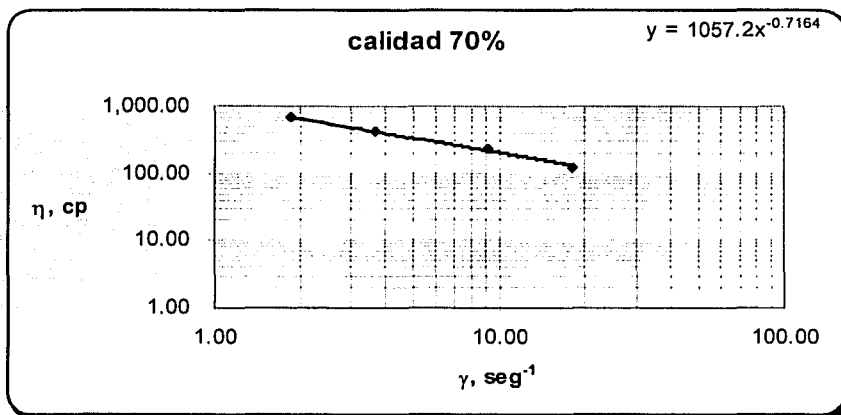


**FIG. 3.4.43.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FIG. 3.4.44.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$



**FIG. 3.4.45.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Calidad,  $\Gamma = 80\%$

**Geometría 1.**

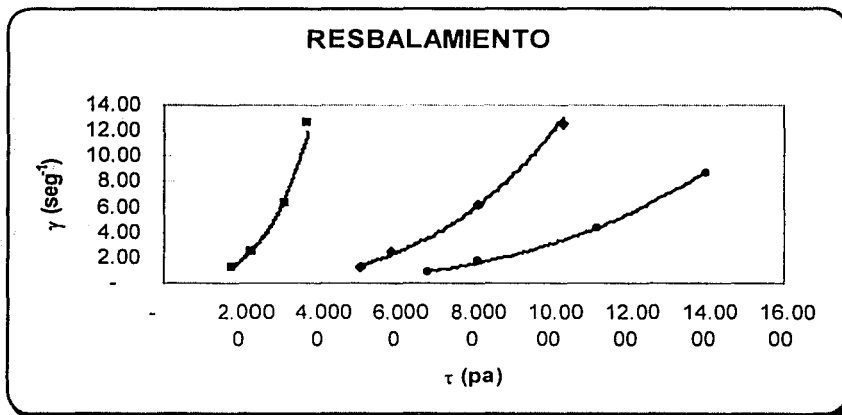
Paleta de disco No. 3      $k_{at} = 0.279$   
 $Rb1 = 0.90 \text{ cm}$       $n = 0.3183$   
 $Rc1 = 1.35 \text{ cm}$       $k_{Ny} = 0.625$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2      $K_{at} = 0.119$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$       $n = 0.3190$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$       $k_{Ny} = 0.632$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

**TABLA No. 17.** *Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 80%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 2.0 %.*

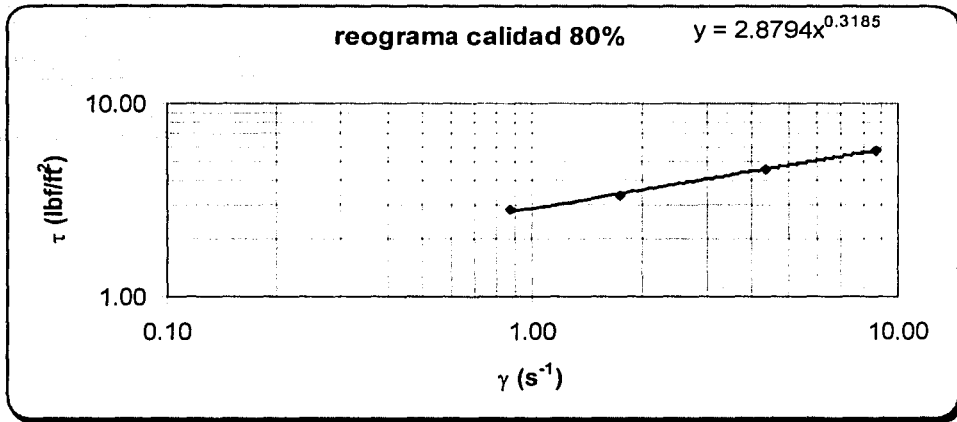
$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	18	5.0220	1.25	15	1.7850	1.26	0.87	7,826.20
4	21	5.8590	2.50	19	2.2610	2.53	1.74	4,667.90
10	29	8.0910	6.25	26	3.0940	6.32	4.35	2,571.94
20	37	10.3230	12.50	31	3.6890	12.64	8.70	1,611.00



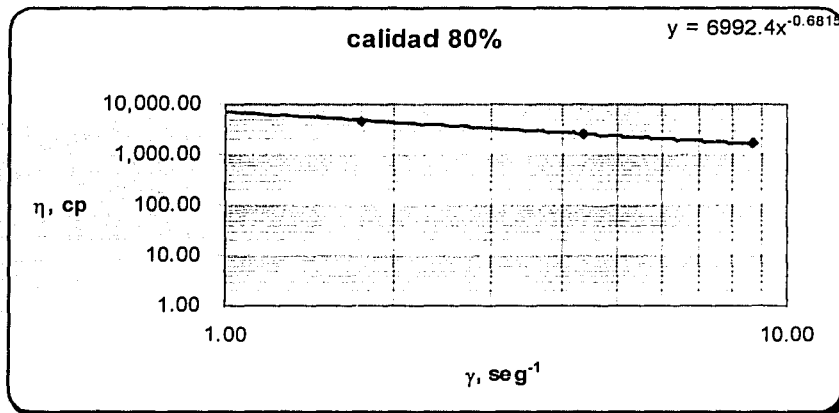
**FIG. 3.4.46.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN





**FIG. 3.4.47.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=2.0\%$



**FIG. 3.4.48.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Calidad,  $\Gamma = 90\%$

**Geometría 1.**

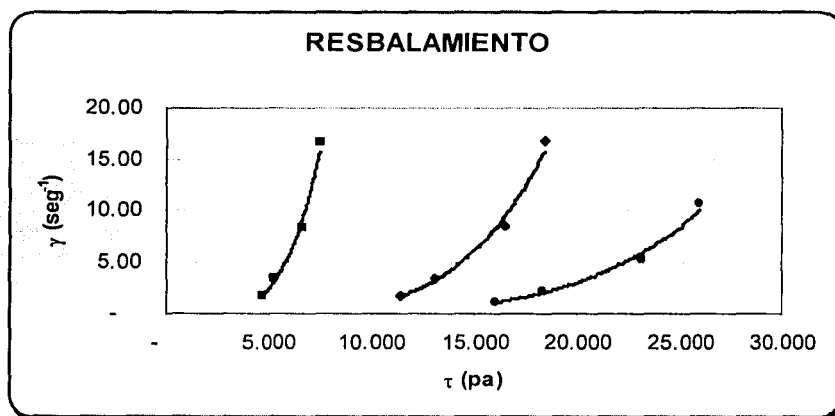
Paleta de disco No. 3      $K_{\alpha\tau} = 0.279$   
 $Rb1 = 0.90 \text{ cm}$       $\mu = 0.2124$   
 $Rc1 = 1.35 \text{ cm}$       $k_{N\gamma} = 0.842$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

**Geometría 2.**

Paleta de disco No. 2      $K_{\alpha\tau} = 0.119$   
 $Rb1 = 1.2 \text{ cm}$       $\mu = 0.2158$   
 $Rc1 = 1.68 \text{ cm}$       $k_{N\gamma} = 0.829$   
 $K (Rb/Rc) = 1.5$

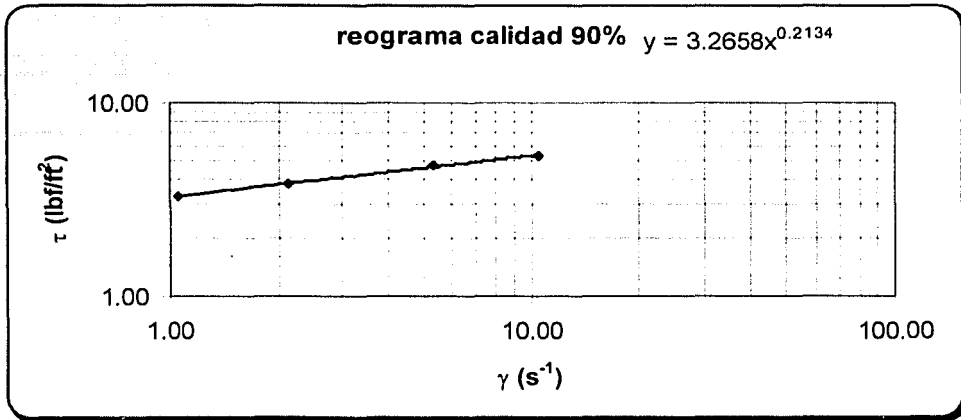
**TABLA No. 18.** *Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 90%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 2.0 %.*

$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	41	11.439	1.68	39	4.641	1.66	1.06	15,234.21
4	47	13.113	3.37	44	5.236	3.32	2.11	8,691.93
10	59	16.461	8.42	56	6.664	8.29	5.28	4,381.73
20	66	18.414	16.83	63	7.497	16.58	10.56	2,454.81

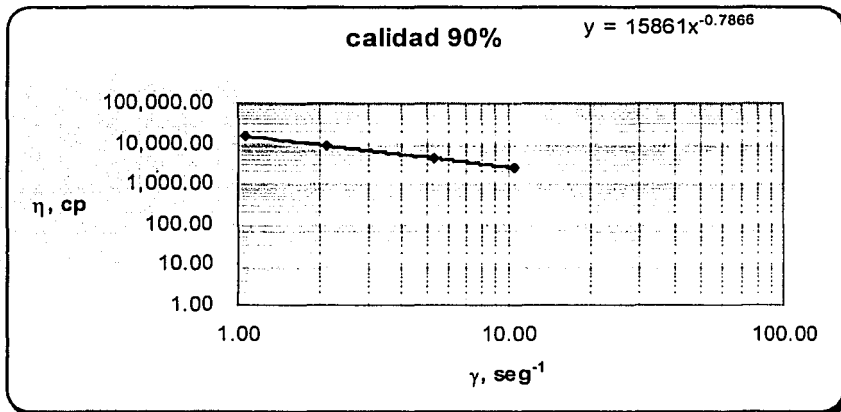


**FIG. 3.4.49.** GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE CUBRIR



**FIG. 3.4.50.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$



**FIG. 3.4.51.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Calidad,  $\Gamma = 95\%$

**Geometría 1.**

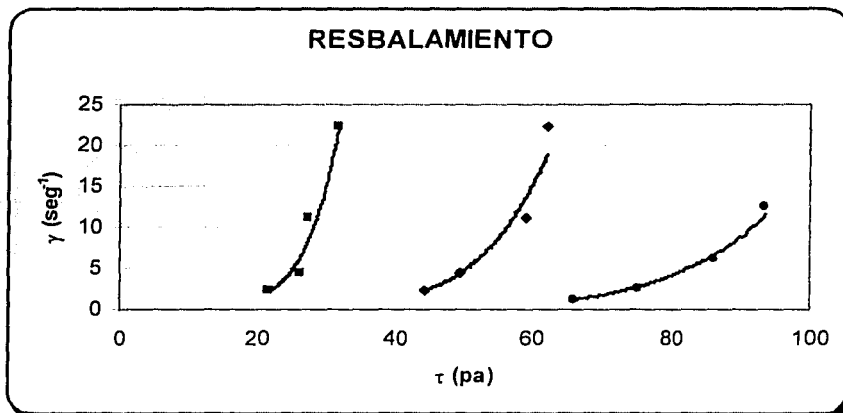
Paleta de disco No. 5       $K_{\alpha\tau} = 1.05$   
 Rb1= 0.55 cm               $n = 0.1536$   
 Rc1=0.99 cm               $k_{N\gamma} = 1.113$   
 K (Rb/Rc)= 1.8

**Geometría 2.**

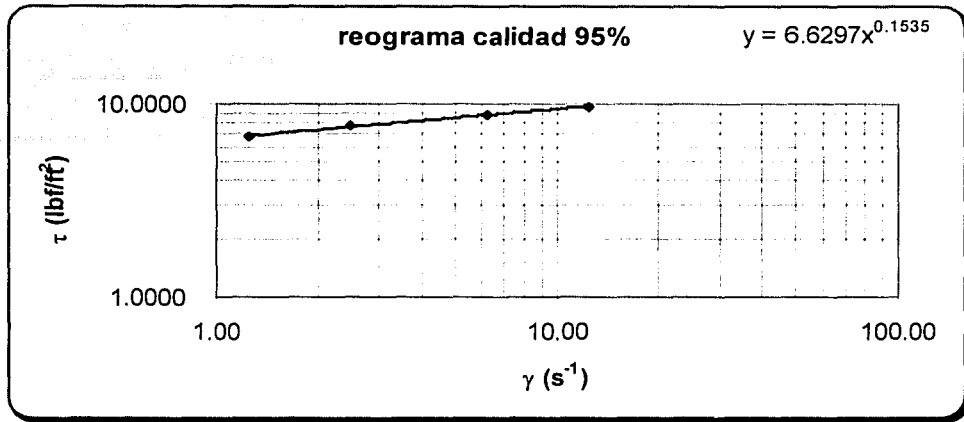
Paleta de disco No. 4       $K_{\alpha\tau} = 0.539$   
 Rb1= 0.7 cm               $n = 0.1533$   
 Rc1=1.26 cm               $k_{N\gamma} = 1.114$   
 K (Rb/Rc)= 1.8

**TABLA No. 19.** *Ejemplificación de los cálculos necesarios para transportar las lecturas obtenidas en el viscosímetro Brookfield modelo RVT a función de viscosidad de espuma de calidad 95%, para un fluido tipo "A" y Concentración de espumante ( $C_{\text{espumante}}$ ) de 2.0 %.*

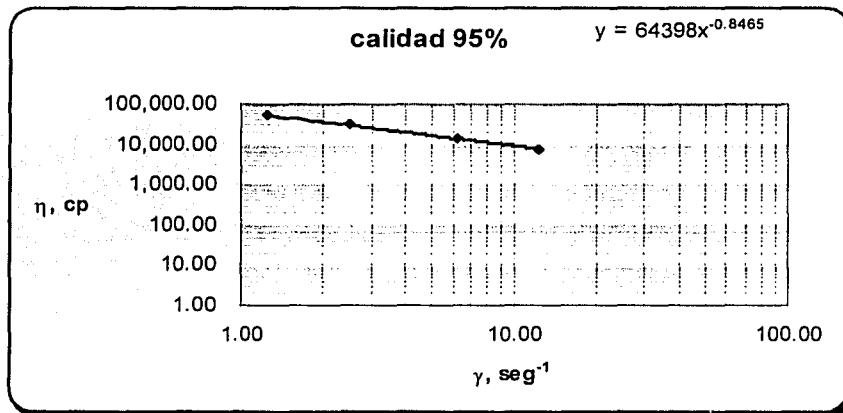
$N_i$ (rpm)	Geometría 1			Geometría 2			$\gamma_i$ corregida ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\eta_i$ Cp
	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )	$\alpha_i$	$\tau_i$ (Pa)	$\gamma_i$ ( $\text{seg}^{-1}$ )		
2	42	44.100	2.23	40	21.560	2.23	1.25	52,755.10
4	47	49.350	4.45	48	25.872	4.46	2.49	30,218.89
10	56	58.800	11.13	50.5	27.220	11.14	6.23	13,822.62
20	59	61.950	22.25	59	31.801	22.29	12.45	7,532.51



**FIG. 3.4.52.** *GRÁFICA QUE EJEMPLIFICA LA CORRECCIÓN POR RESBALAMIENTO DE UNA ESPUMA CON CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$*



**FIG. 3.4.53.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=2.0\%$



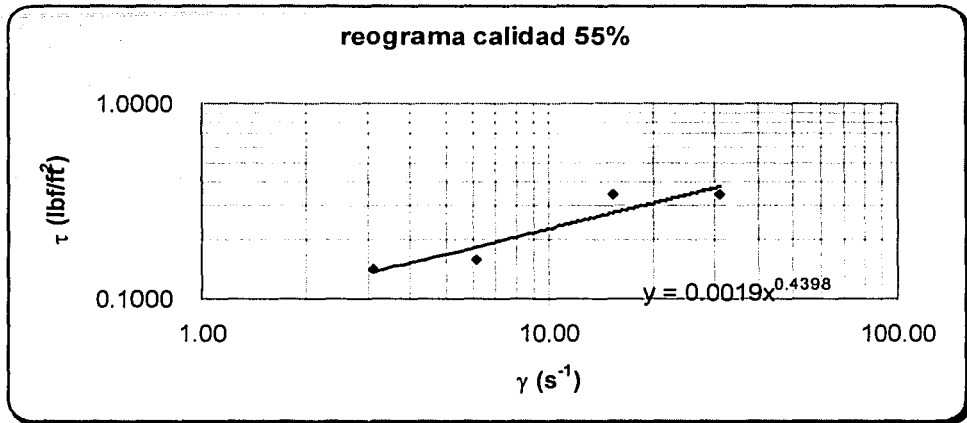
**FIG. 3.4.54.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "A",  $C_{ESPUMANTE}=2.0\%$

El mismo procedimiento se sigue para el caso del fluido tipo B, las gráficas obtenidas se resumen a continuación.

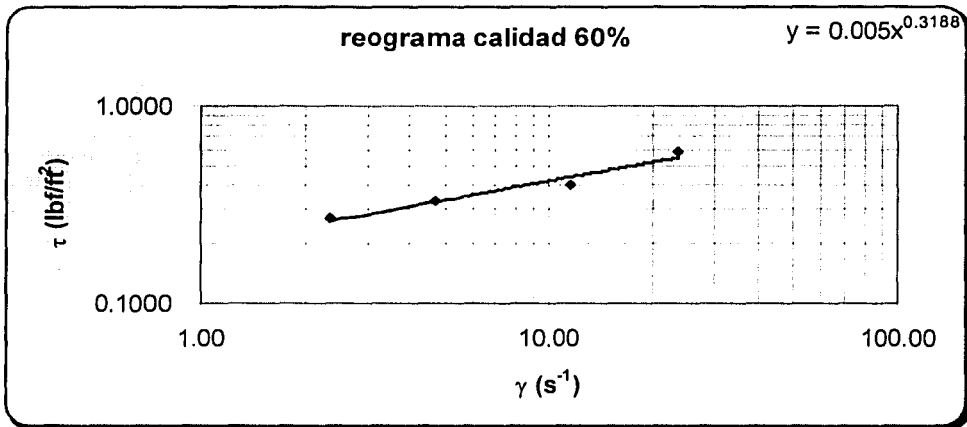
TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

FLUIDO TIPO "B"

Espumante = 1.0 %



**FIG. 3.4.55.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$



**FIG. 3.4.56.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

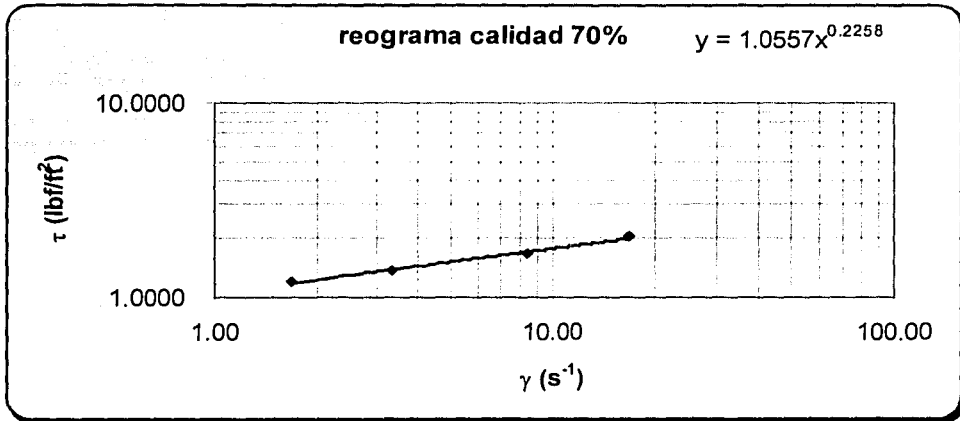


FIG. 3.4.57. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

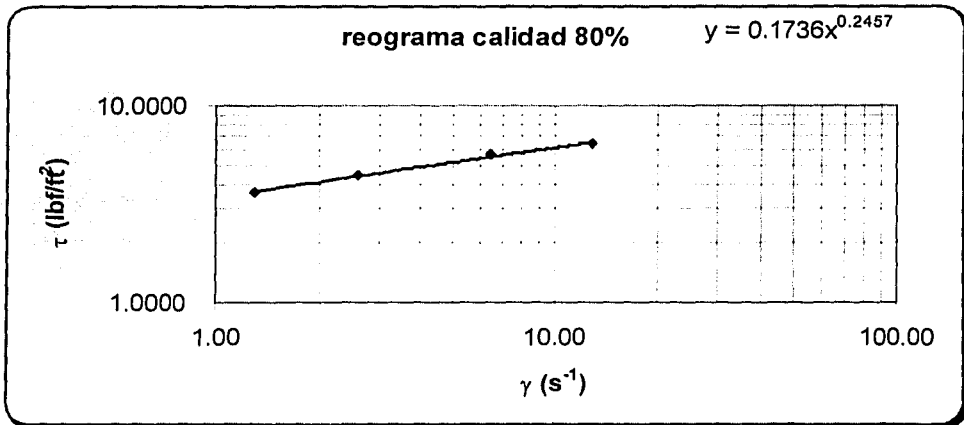
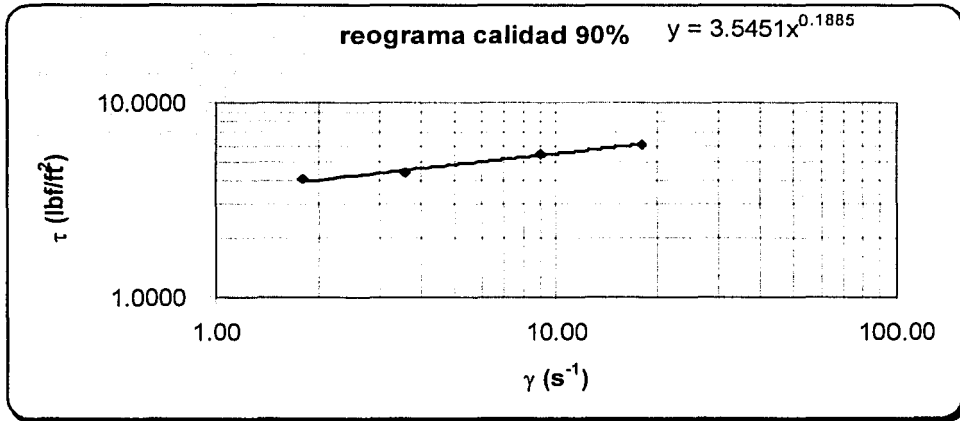
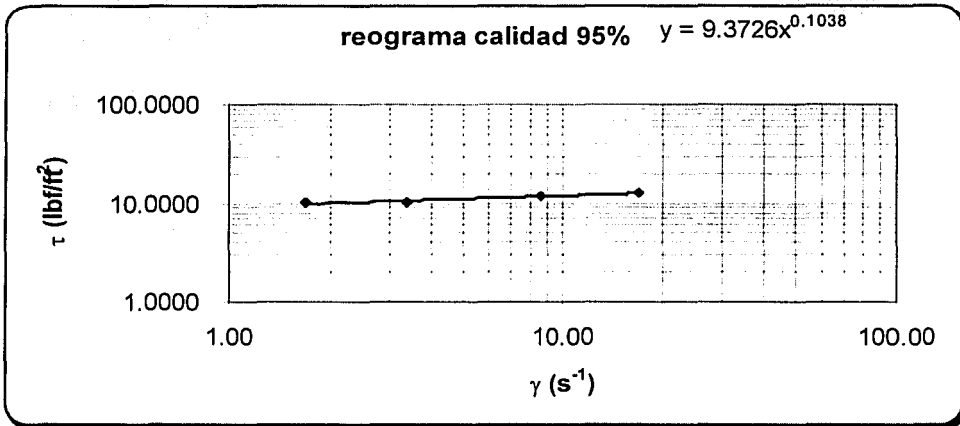


FIG. 3.4.58. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

TESIS  
FALLA DE



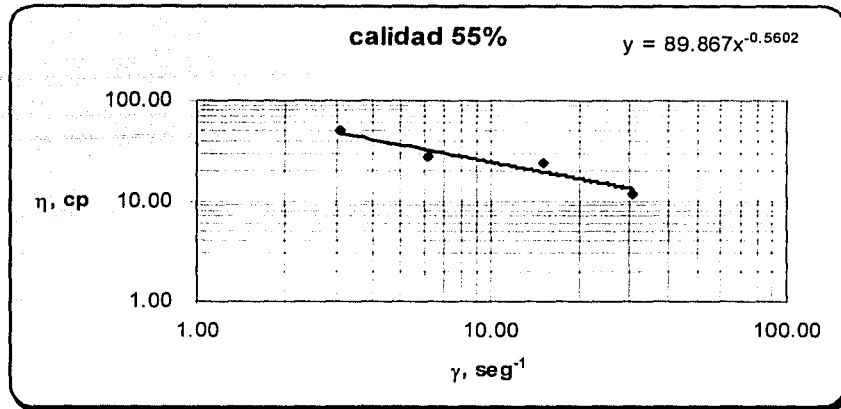
**FIG. 3.4.59.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$



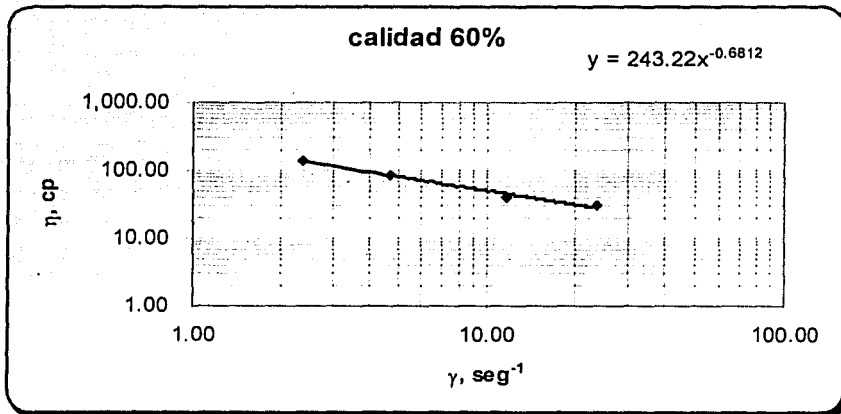
**FIG. 3.4.60.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$





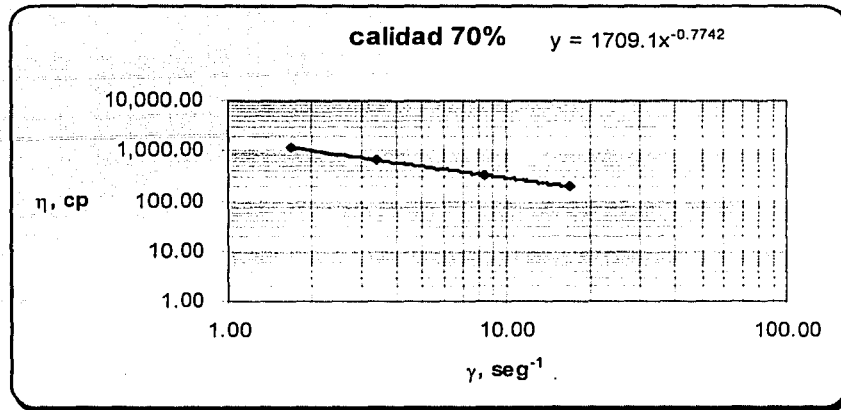


**FIG. 3.4.61.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

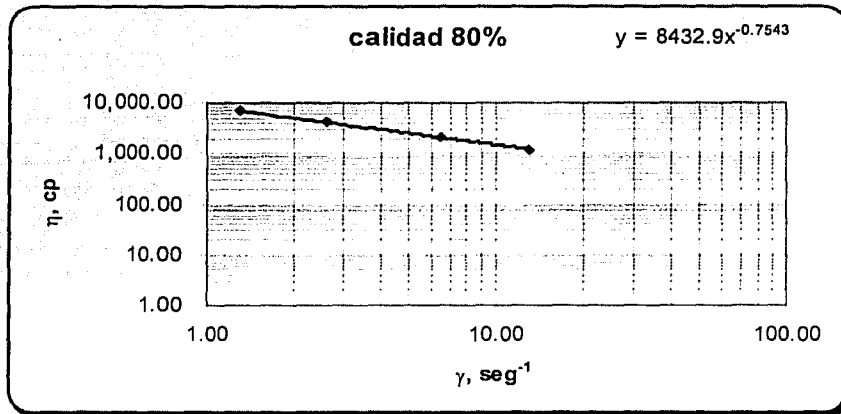


**FIG. 3.4.62.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

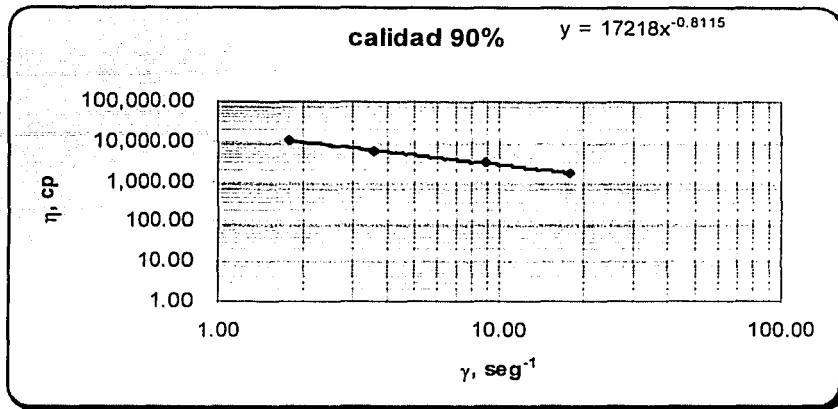


**FIG. 3.4.63.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

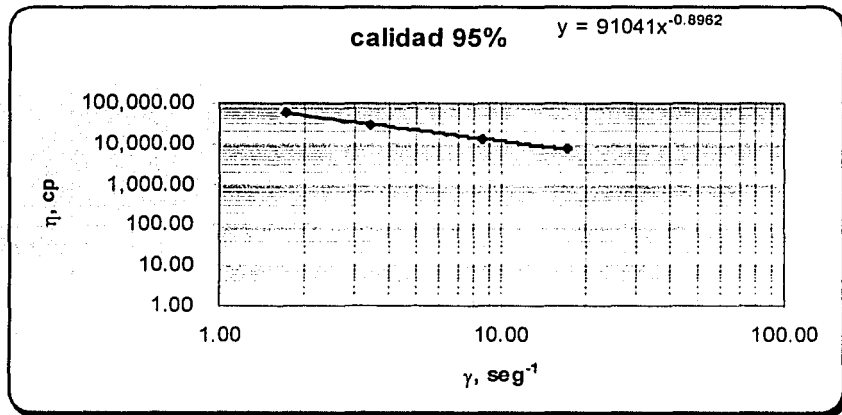


**FIG. 3.4.64.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.0\%$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



**FIG. 3.4.65.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{ESPUMANTE}=1.0\%$



**FIG. 3.4.66.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{ESPUMANTE}=1.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Espumante= 1.5 %

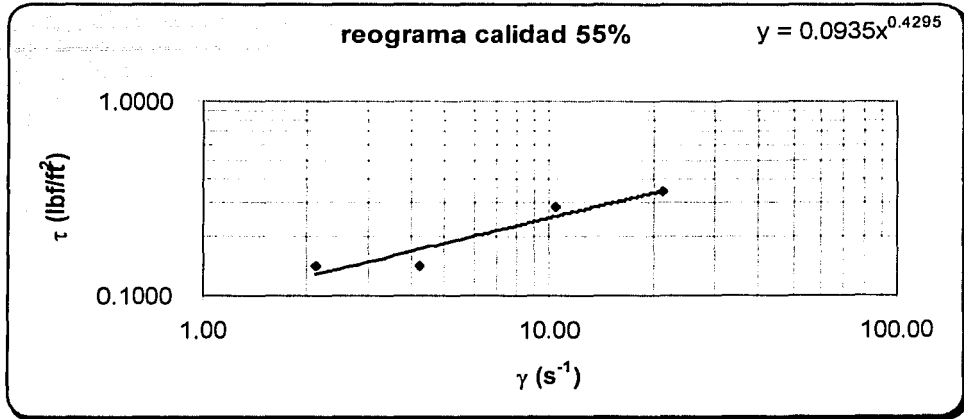


FIG. 3.4.67. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

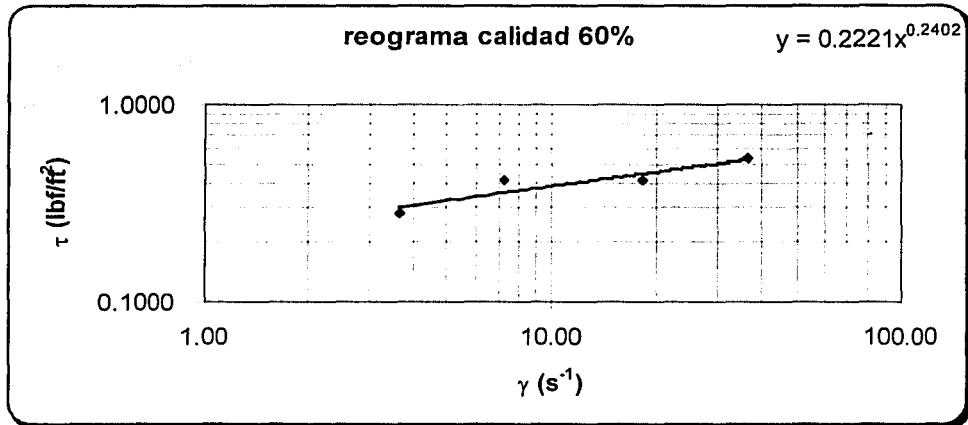
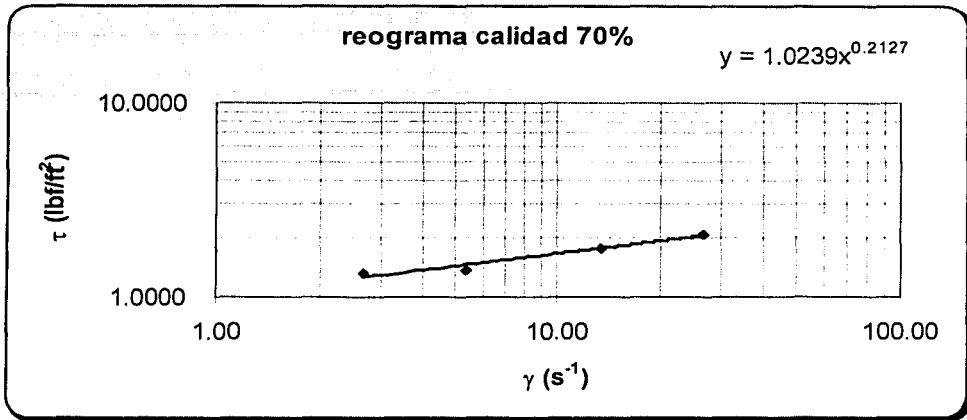
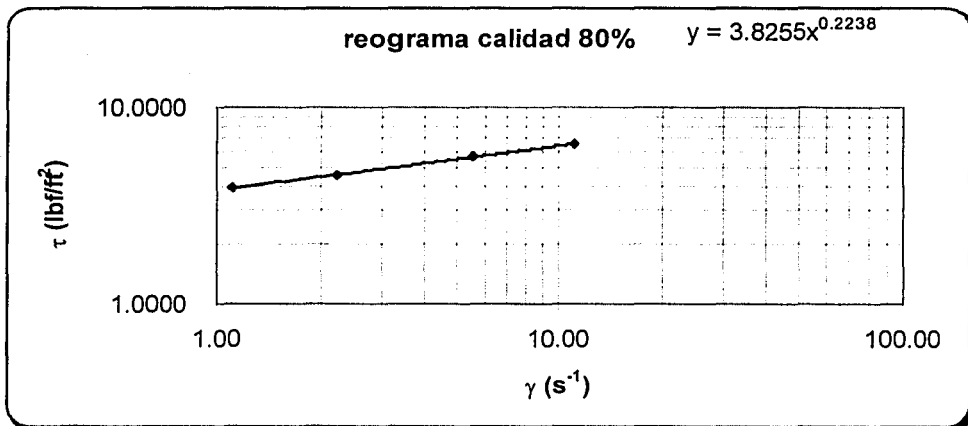


FIG. 3.4.68. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$



**FIG. 3.4.69.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$



**FIG. 3.4.70.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

TESIS CON  
 FALLA DE CALIDAD

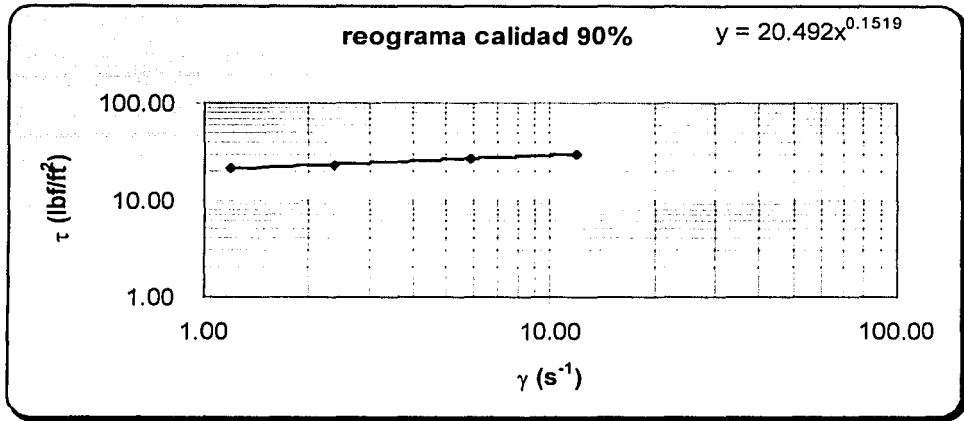


FIG. 3.4.71. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

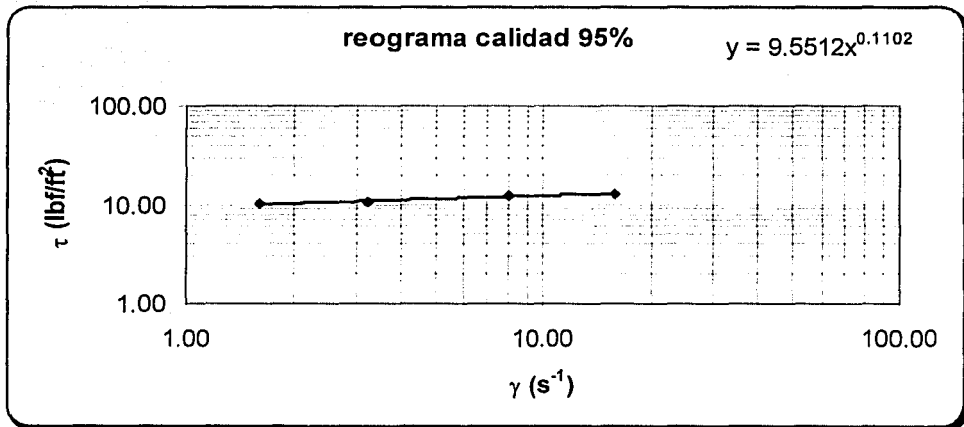
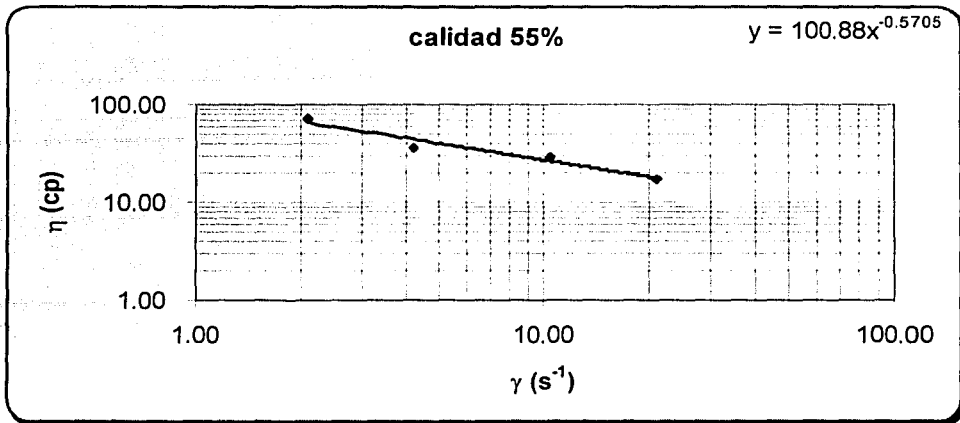
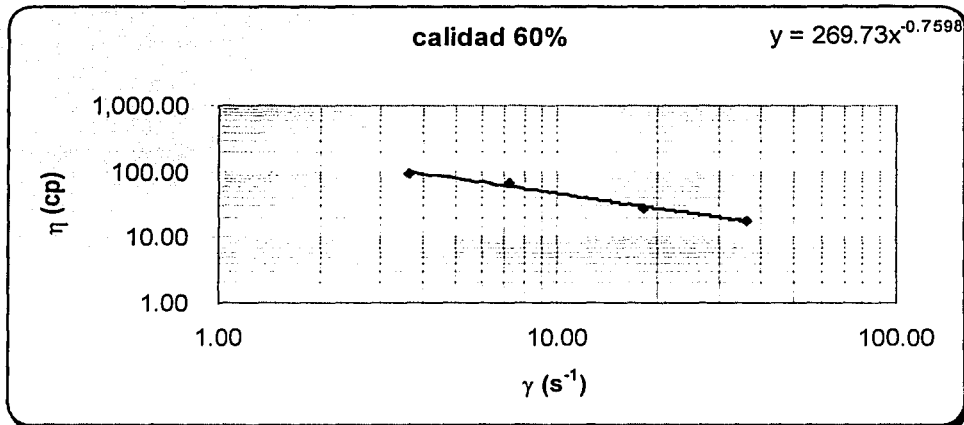


FIG. 3.4.72. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

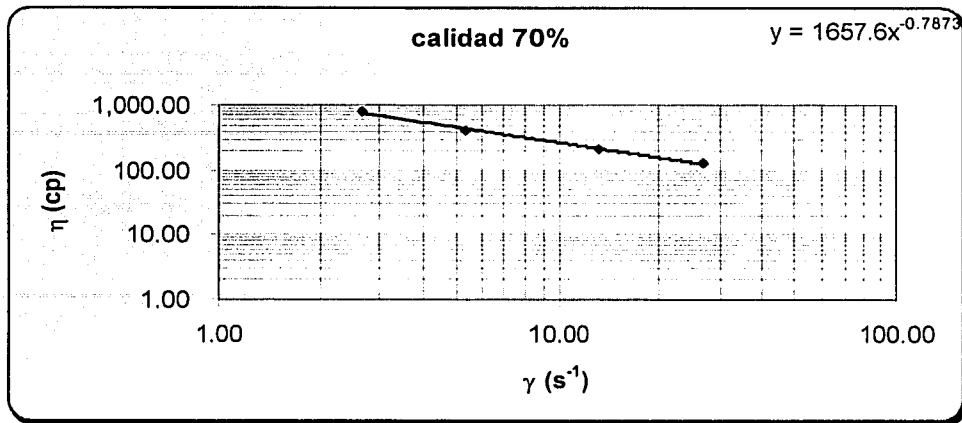


**FIG. 3.4.73.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

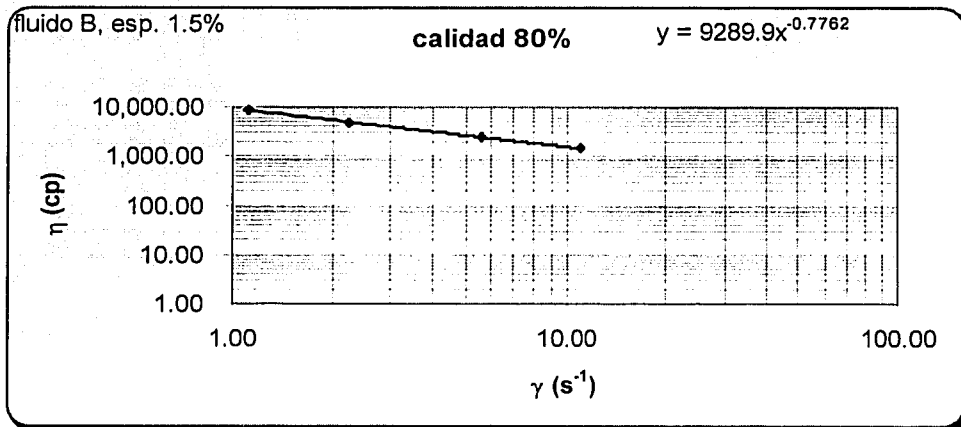


**FIG. 3.4.74.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



**FIG. 3.4.75.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$



**FIG. 3.4.76.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



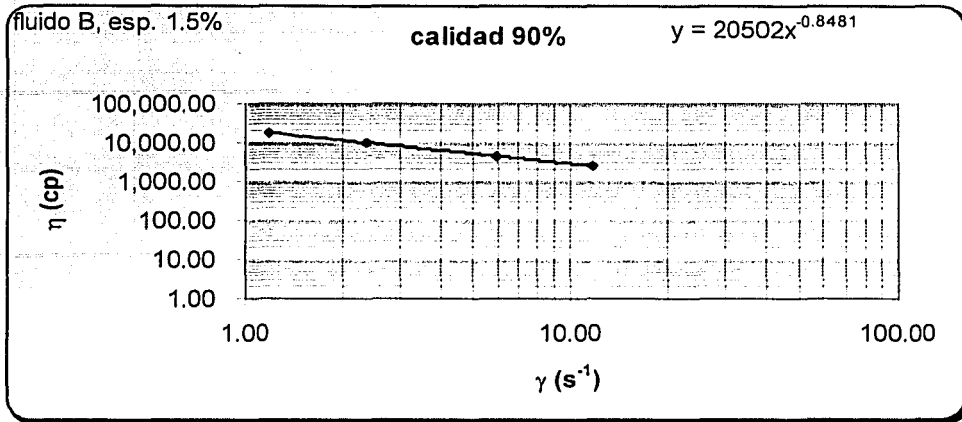


FIG. 3.4.77. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

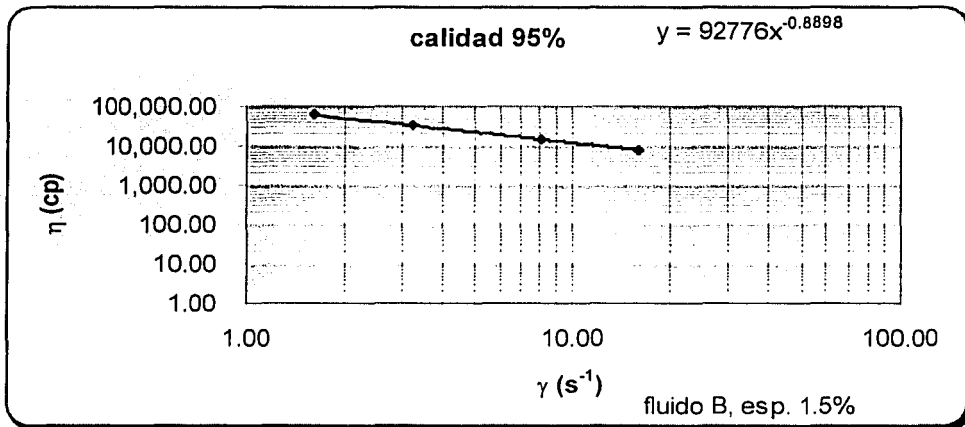


FIG. 3.4.78. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$ , QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=1.5\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Espumante = 2.0 %

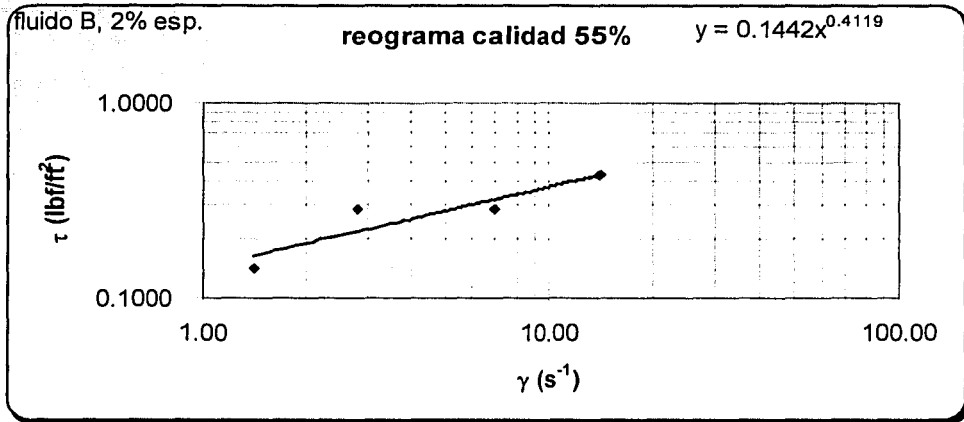


FIG. 3.4.79. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

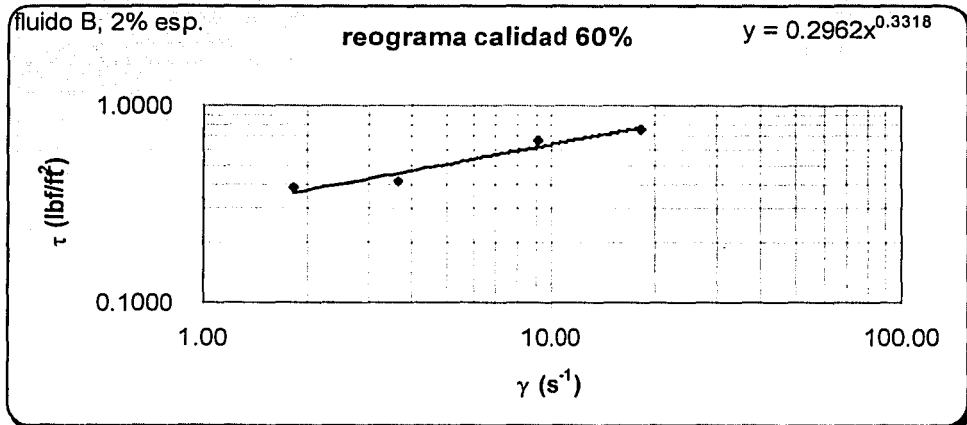


FIG. 3.4.80. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

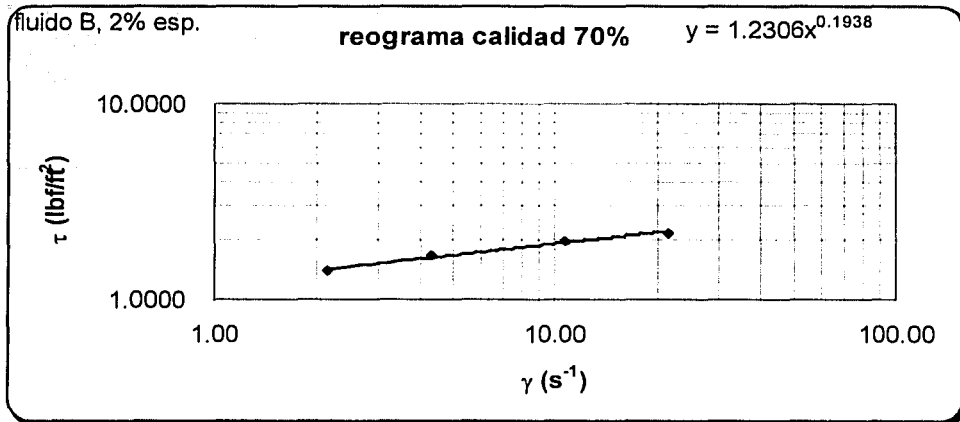


FIG. 3.4.81. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_1$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_1$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

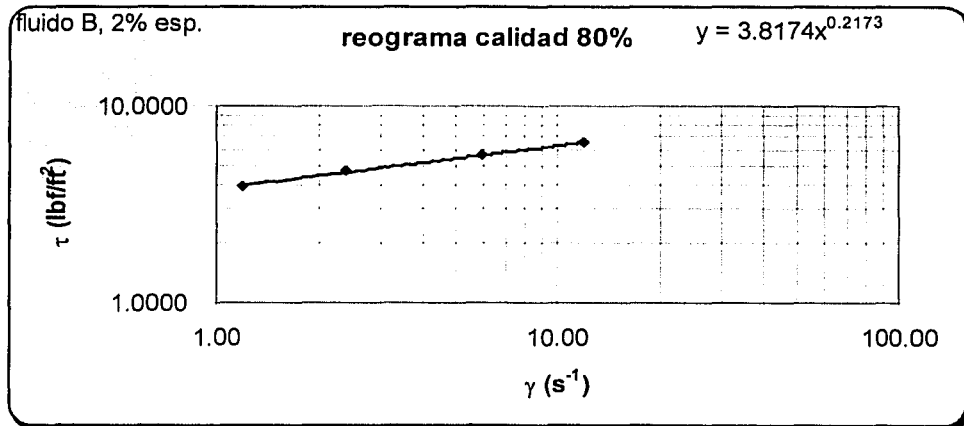
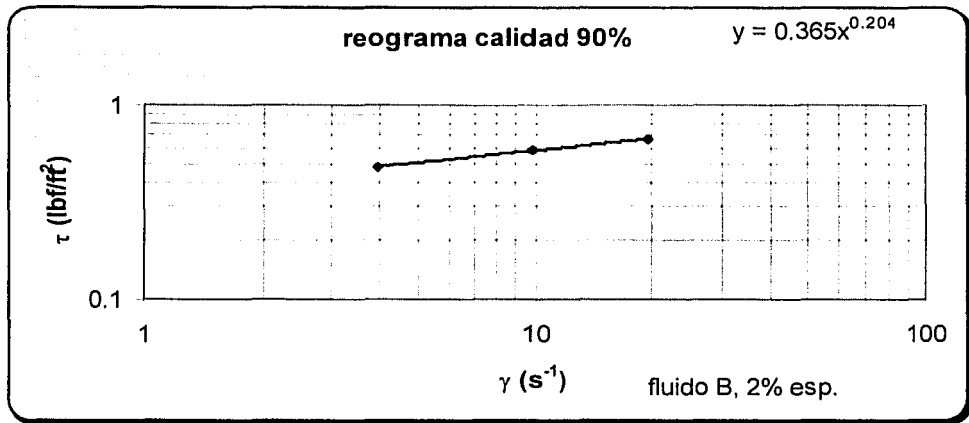
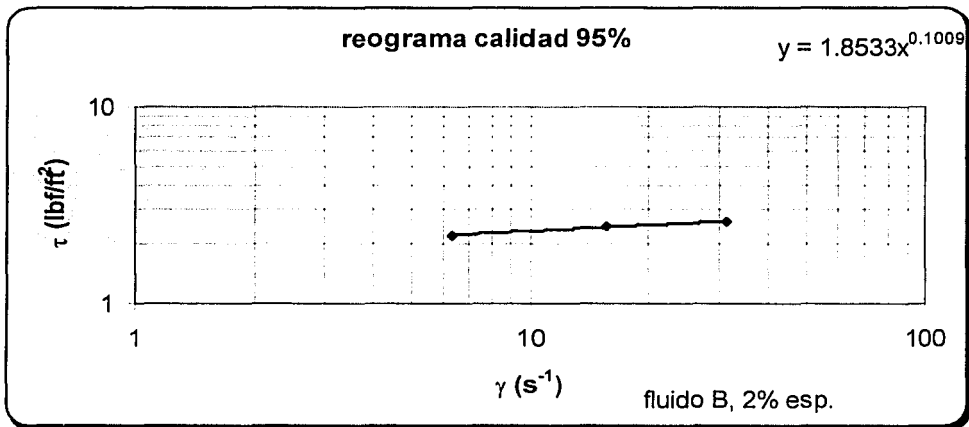


FIG. 3.4.82. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_1$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_1$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FIG. 3.4.83.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$



**FIG. 3.4.84.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{\text{ESPUMANTE}}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

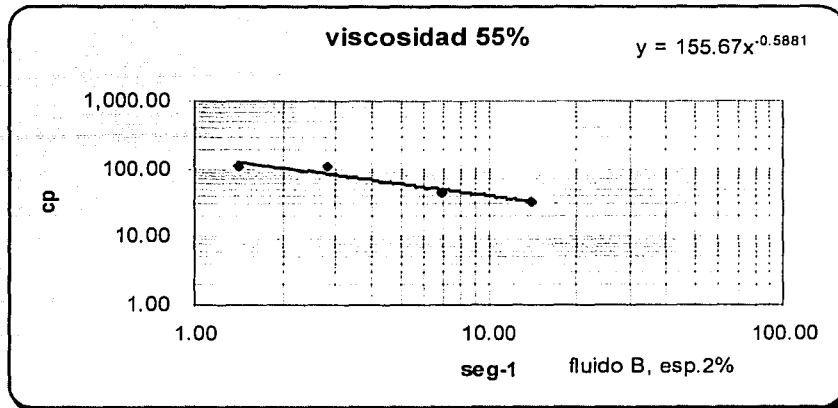


FIG. 3.4.85. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{ESPUMANTE}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

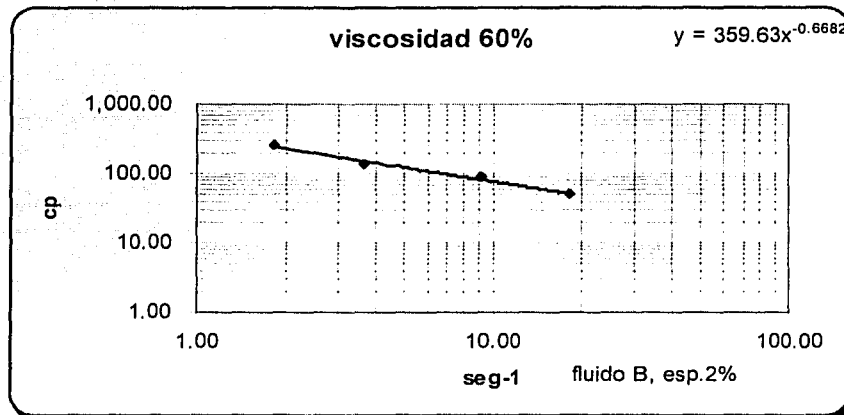


FIG. 3.4.86. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{ESPUMANTE}=2.0\%$

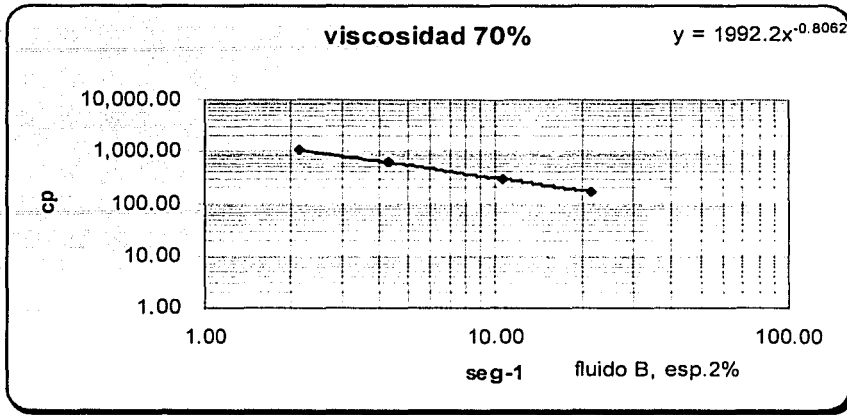


FIG. 3.4.87. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\dot{\gamma}_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{ESPUMANTE}=2.0\%$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

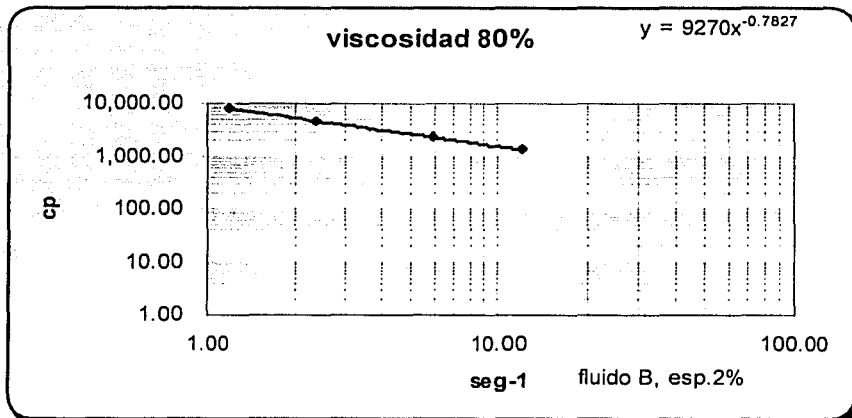


FIG. 3.4.88. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\dot{\gamma}_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{ESPUMANTE}=2.0\%$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

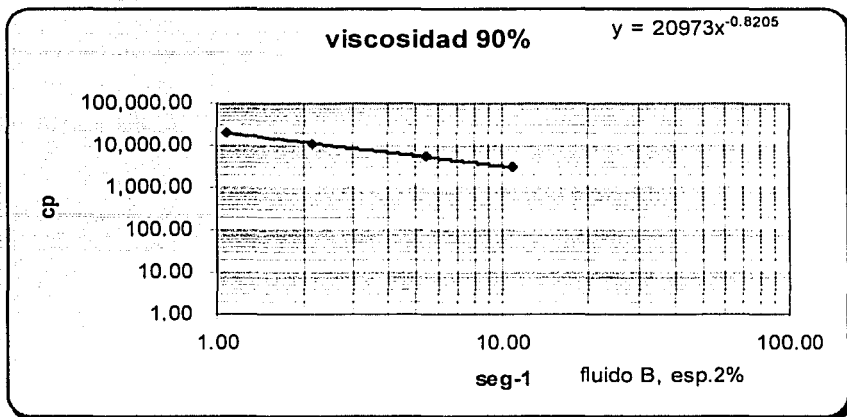


FIG. 3.4.89. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{ESPUMANTE}=2.0\%$

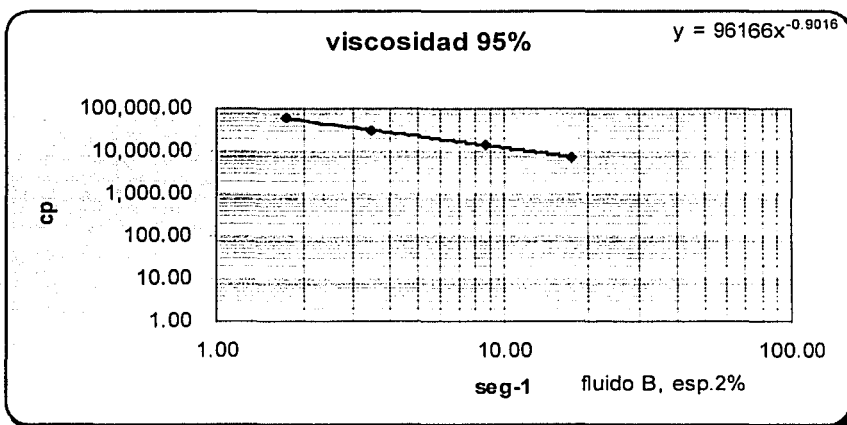


FIG. 3.4.90. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE EJEMPLIFICA EL REOGRAMA DE UNA ESPUMA DE CALIDAD 95%, CON UN FLUIDO LÍQUIDO TIPO "B",  $C_{ESPUMANTE}=2.0\%$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

## **CAPÍTULO IV**



## CAPÍTULO 4.

### RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

#### 4.1. RESULTADOS.

---

- En la literatura de espumas se encontró que una espuma rígida contiene una concentración de polímero viscosificante menor al 2%, sin embargo, en este trabajo se probaron dos concentraciones: 0.2% y 1.0%. El motivo fue la viscosidad de la fase líquida usada en operaciones de campo en la Región Sur de la zona Petrolera de México, donde en promedio usan 22-25 cp. Al preparar el fluido base con 0.2 % de polímero en el laboratorio, tan solo se tenía una viscosidad de 5 cp, por tal motivo se incrementó la concentración a 1.0 %, logrando alcanzar 22 cp de viscosidad plástica. La explicación que se le ha dado a este hecho es la calidad del polímero usado, pues es de común conocimiento que la concentración de sustancia activa en los productos químicos varía de acuerdo al laboratorio que lo fabrica.
- Para este caso, se han concentrado las ecuaciones de cantidad de movimiento por calidad concluyendo en una sola afectada por la concentración de polímero a usar.

**TABLA No. 1. ECUACIONES DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO VISCOSIFICANTE.**

<i>Calidad, <math>\Gamma</math> (%)</i>	<i>Ecuación de cantidad de movimiento</i>
55	$\tau = (0.136 - 2.575 \varphi_2) \gamma^{0.3792}$
60	$\tau = (0.2140 + 9.5875 \varphi_2) \gamma^{0.2821}$
70	$\tau = (1.1209 + 83.06 \varphi_2) \gamma^{0.2455}$
80	$\tau = (6.1519 + 355.16 \varphi_2) \gamma^{0.2881}$
90	$\tau = (15.703 + 481.41 \varphi_2) \gamma^{0.1939}$
95	$\tau = (63.156 + 3765.6 \varphi_2) \gamma^{0.1304}$

Donde  $\varphi_2$ , es la concentración de polímero [fracción],  $\varphi_2 > 0.2\%$

$\tau$ , esfuerzo de corte [lb/ft<sup>2</sup>]

$\gamma$ , velocidad de corte [seg<sup>-1</sup>]

- Sin embargo, si se hace variar la concentración de polímero desde 0.2% a 1.0% no se observa diferencia significativa, por lo que se puede concluir en una sola expresión de cantidad de movimiento por calidad, dando rangos de valores para los índices de consistencia y de comportamiento de flujo ( $k'$ ,  $n'$ ).

En unidades consistentes, la ecuación de Estado para el fluido espumado es del tipo ley de potencias, donde  $k'$  y  $n'$  tienen los siguientes valores:

$$\tau = k \gamma^n \dots (1)$$

$$\eta = k \gamma^{n-1} \dots (2)$$

donde:

$\tau$ , esfuerzo de corte [Pa]

$\gamma$ , velocidad de corte [seg<sup>-1</sup>]

$\eta$ , viscosidad efectiva de la espuma [Pa-seg]

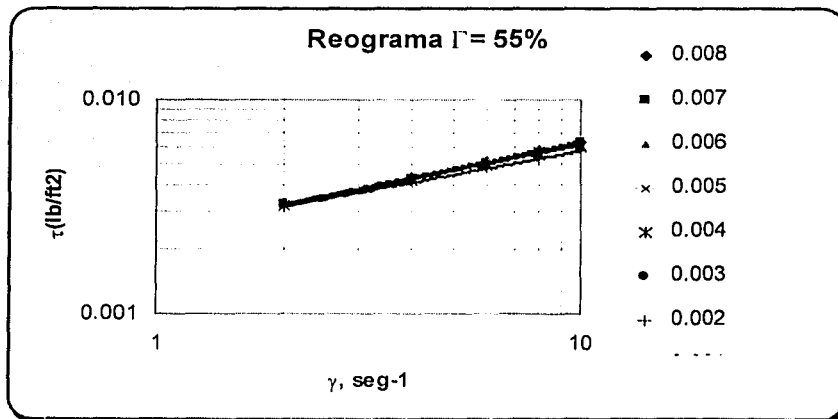
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**TABLA No. 2. RANGOS DE VALORES DE LOS ÍNDICES DE CONSISTENCIA Y COMPORTAMIENTO DE FLUJO, PARA LA ECUACIÓN DE ESTADO EN UNIDADES CONSISTENTES.**

CALIDAD, $\Gamma$ (%)	Índice de consistencia, $k'$ [Pa-seg <sup>n</sup> ]	Índice de comportamiento de flujo, $n'$
55 - 60	0.1244 - 0.2572	0.3792 - 0.2821
60 - 70	0.2572 - 1.495	0.2821 - 0.2455
70 - 80	1.495 - 7.75	0.2455 - 0.2881
80 - 90	7.75 - 17.868	0.2881 - 0.1939
90 - 95	17.868 - 80.1013	0.1939 - 0.1304

**TABLA No. 3. RANGOS DE VALORES DE LOS ÍNDICES DE CONSISTENCIA Y COMPORTAMIENTO DE FLUJO, PARA LA ECUACIÓN DE ESTADO EN UNIDADES DE CAMPO.**

CALIDAD, $\Gamma$ (%)	Índice de consistencia, $k'$ Lb <sub>r</sub> -seg <sup>n</sup> /(ft <sup>2</sup> )	Índice de comportamiento de flujo, $n'$
55 - 60	0.0026 - 0.0054	0.3792 - 0.2821
60 - 70	0.0054 - 0.0312	0.2821 - 0.2455
70 - 80	0.0312 - 0.1618	0.2455 - 0.2881
80 - 90	0.1618 - 0.3730	0.2881 - 0.1939
90 - 95	0.3730 - 1.6723	0.1939 - 0.1304



**FIG. 4.4.1. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 55% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.**

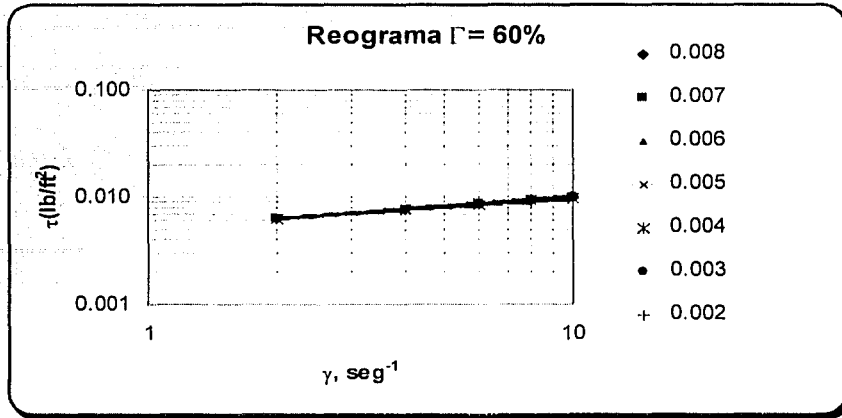


FIG. 4.4.2. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\dot{\gamma}$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 60% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.

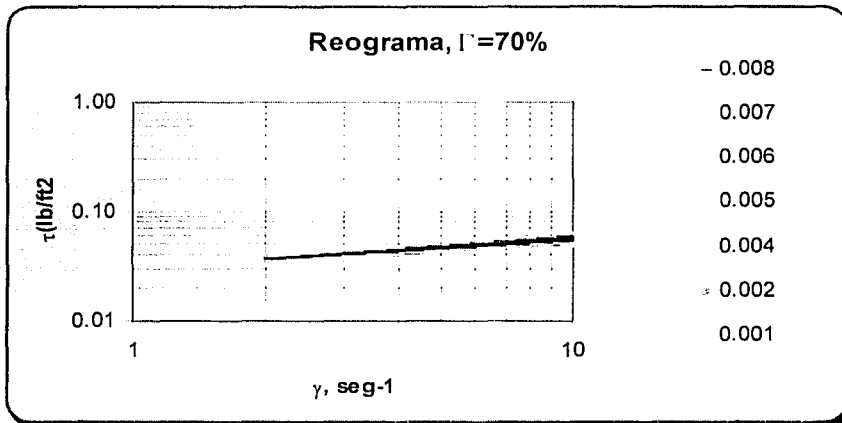


FIG. 4.4.3. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\dot{\gamma}$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 70% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

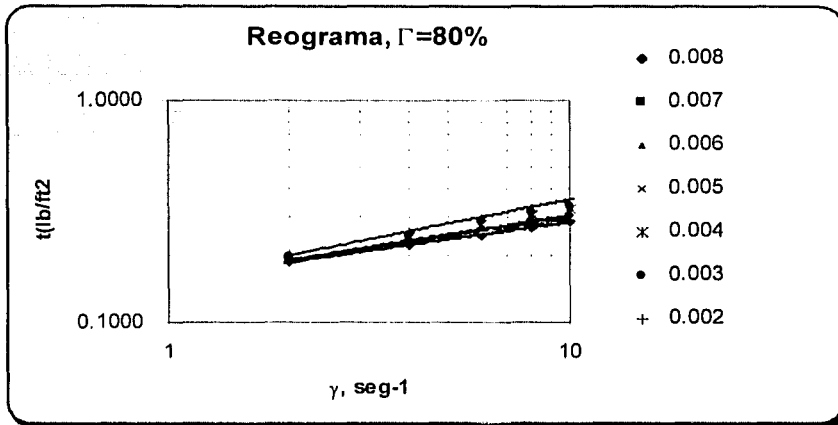


FIG. 4.4.4. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\dot{\gamma}$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 80% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.

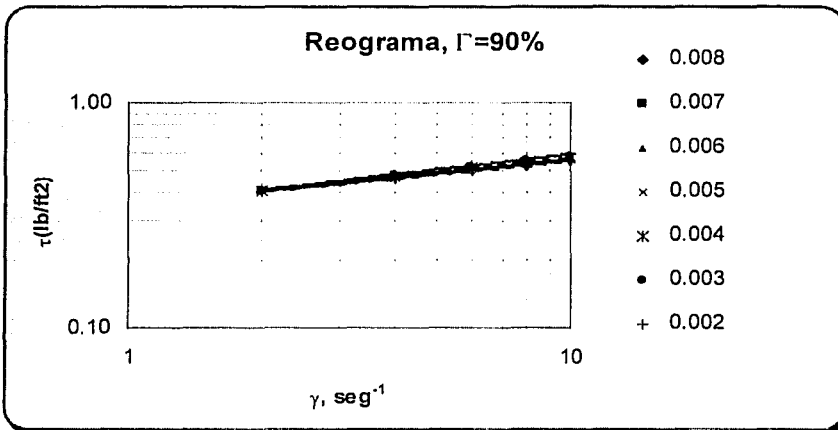


FIG. 4.4.5. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\dot{\gamma}$  vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 90% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

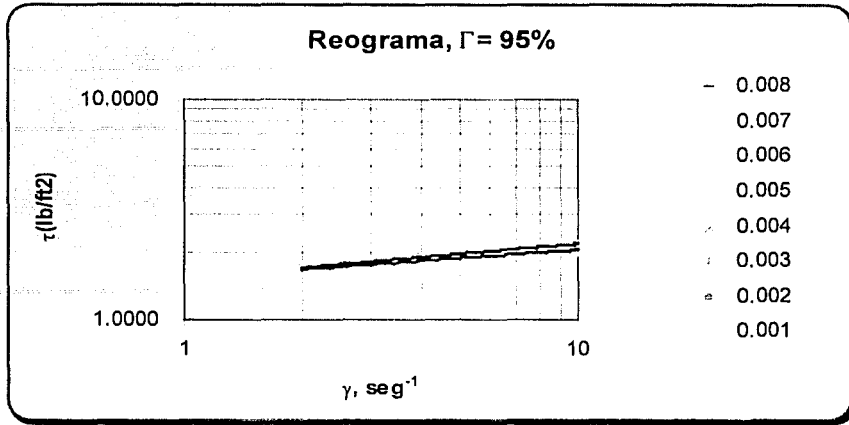


FIG. 4.4.6. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$ , vs. ESFUERZO DE CORTE,  $\tau$ , QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CALIDAD 95% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.

- Para saber si estos valores encontrados en este trabajo experimental no contradicen la teoría de las espumas, se ha comparado con los valores obtenidos por Mitchell<sup>1</sup>. Según las gráficas publicadas por este autor, si extrapolamos las velocidades reportadas a aquéllas que se usaron en este trabajo de investigación, se puede comparar en forma gráfica.

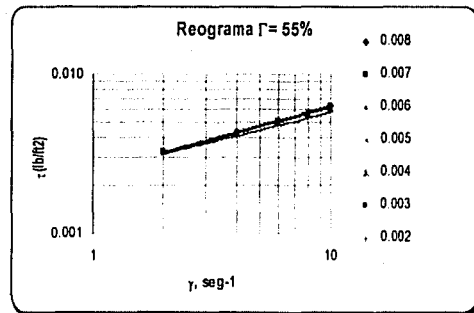
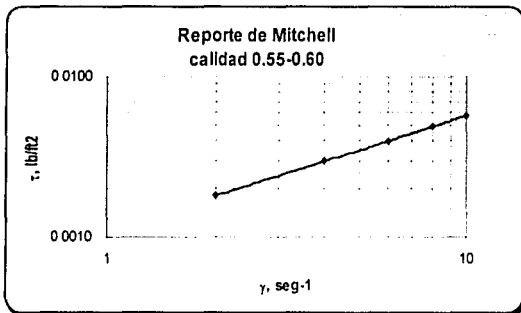
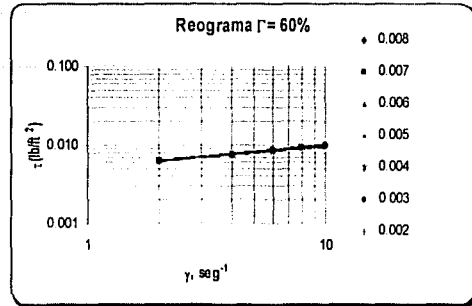
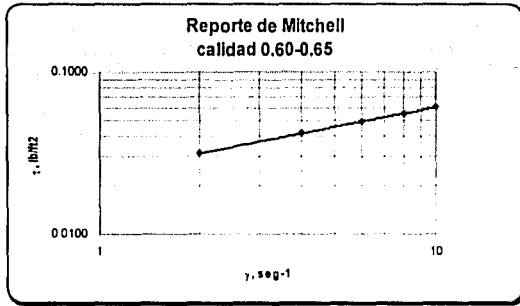


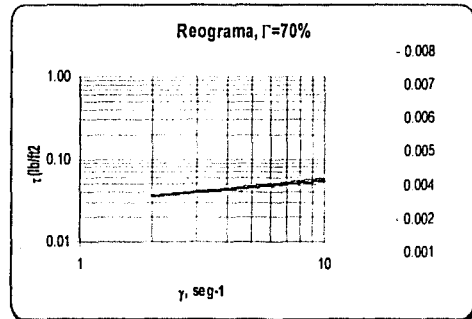
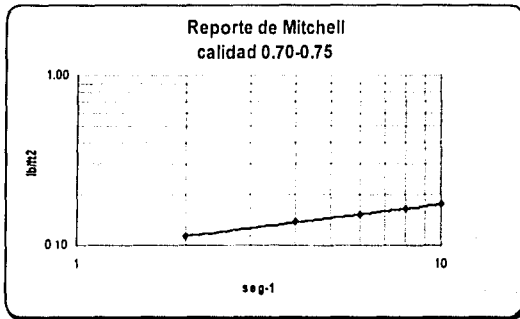
FIG. 4.4.7. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

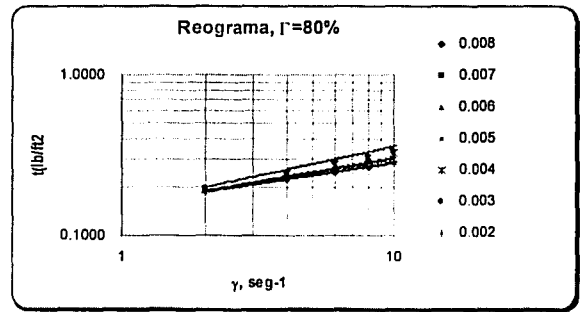
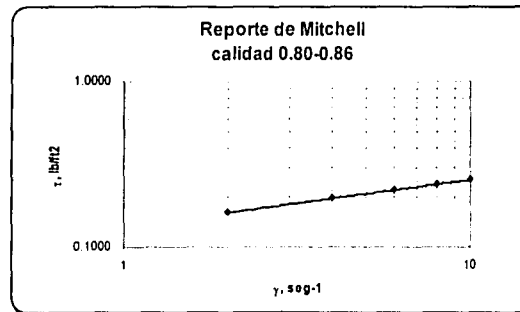
<sup>1</sup> Mitchell, B.J. Dr.; "Test data fill theory gap on using foam as a drilling fluid"; The oil an gas journal, sept. 6, 1971.



**FIG. 4.4.8.** COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%.

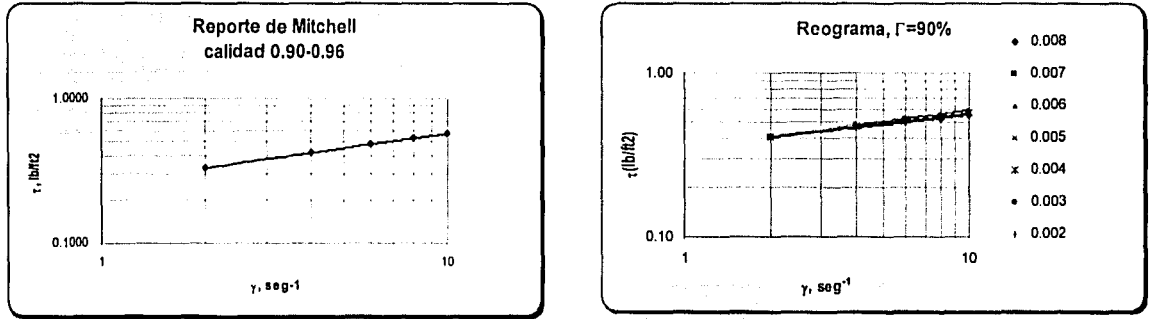


**FIG. 4.4.9.** COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%.



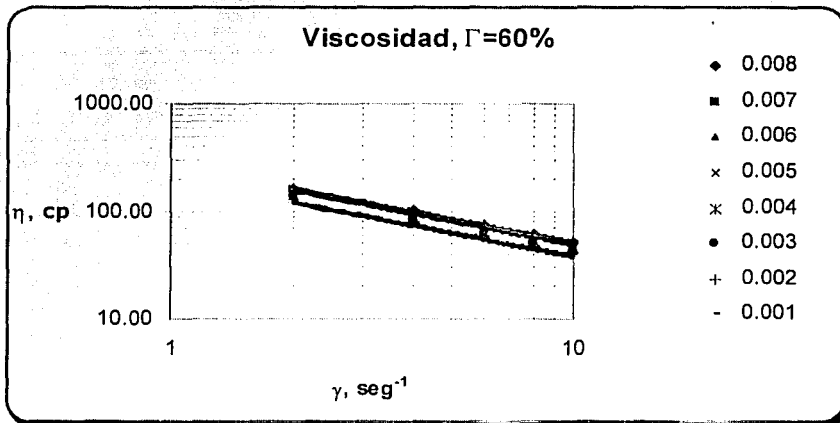
**FIG. 4.4.10.** COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



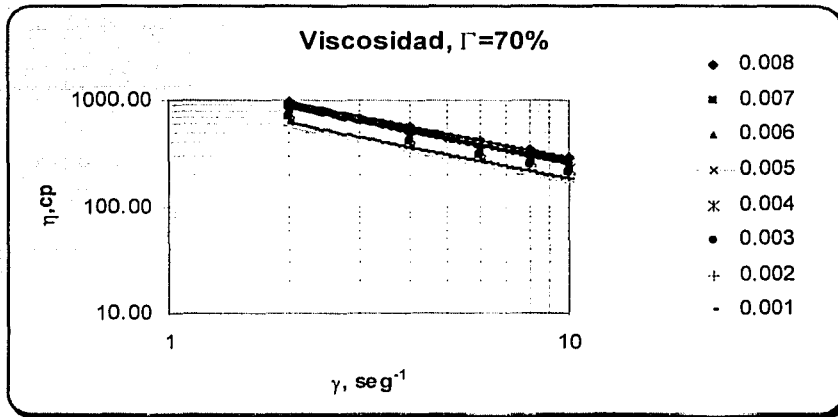
**FIG. 4.4.11.** COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%

- Para el caso de la viscosidad, se observa cierto impacto en la magnitud de la viscosidad con respecto a la concentración de polímero, sin embargo se proporcionan las ecuaciones específicas de viscosidad como función de la concentración de polímero, además de rangos de coeficientes y exponentes para ecuaciones generales de viscosidad como función únicamente de la velocidad de corte.

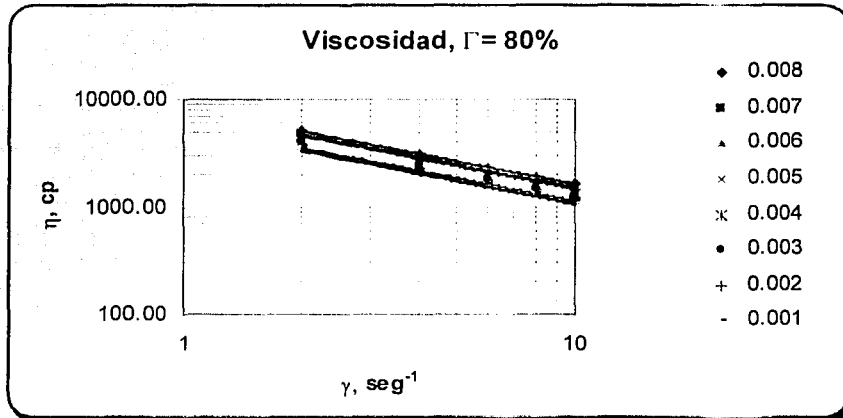


**FIG. 4.4.12.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CON CALIDAD 60% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.



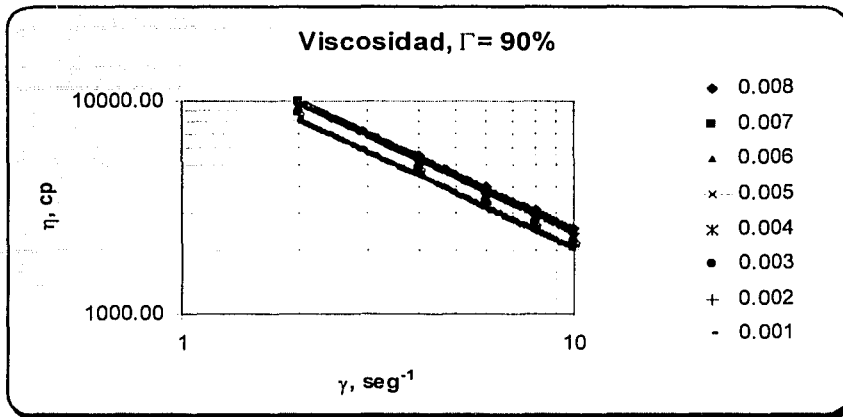


**FIG. 4.4.13.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CON CALIDAD 70% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.

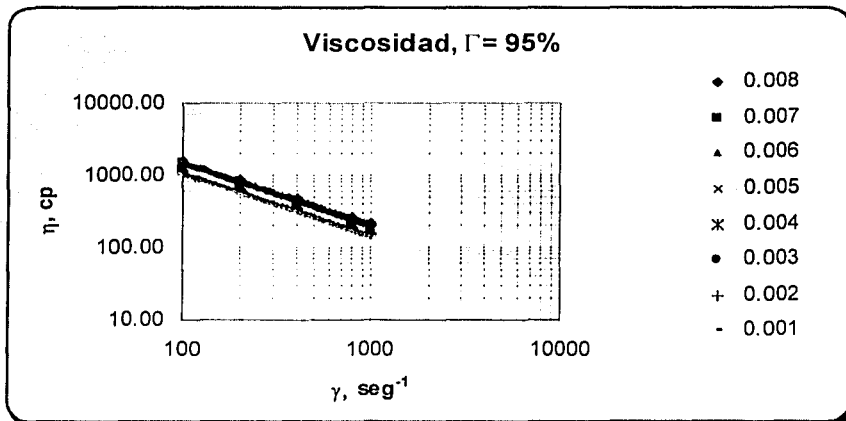


**FIG. 4.4.14.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CON CALIDAD 80% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FIG. 4.4.15.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CON CALIDAD 90% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.



**FIG. 4.4.16.** GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma_i$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta_i$  QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA ESPUMA CON CALIDAD 95% A DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.

- De la misma forma se pueden comparar las viscosidades obtenidas con las reportadas por Mitchell.

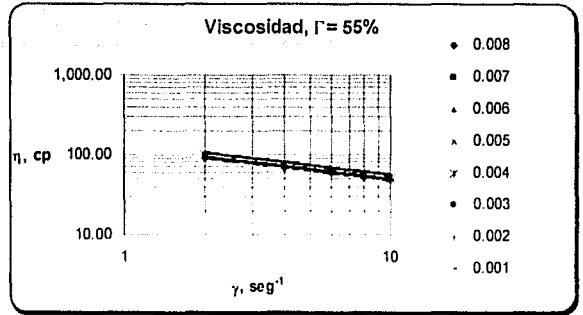
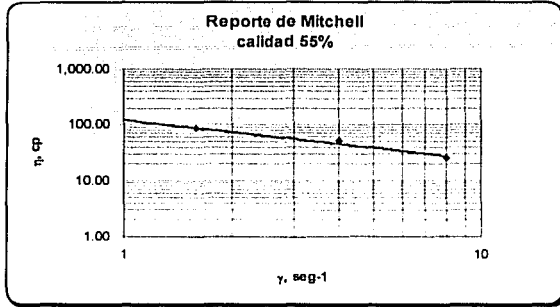


FIG. 4.4.18. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LA ESPUMA OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 55%

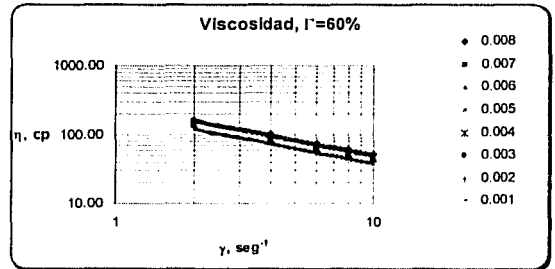
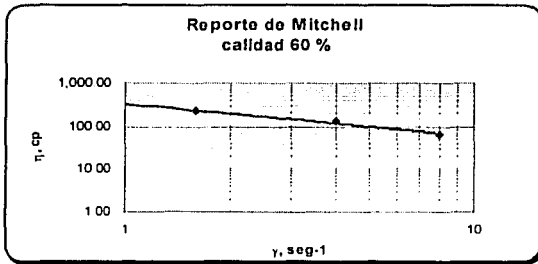


FIG. 4.4.19. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LA ESPUMA OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 60%

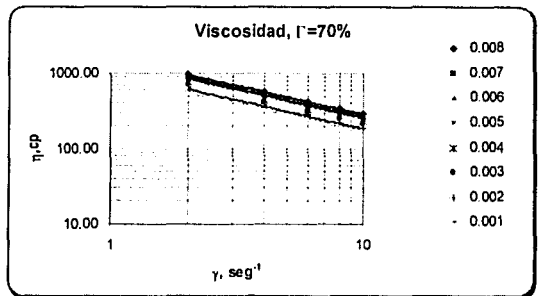
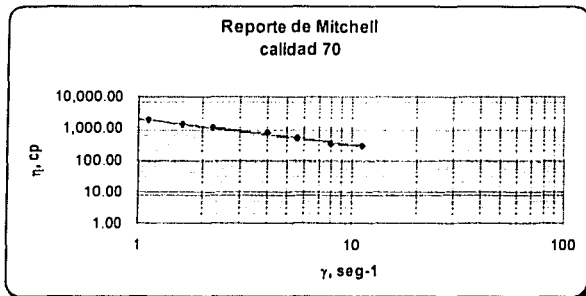


FIG. 4.4.20. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LA ESPUMA OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%

UNA ESPUMA DE CALIDAD 70%

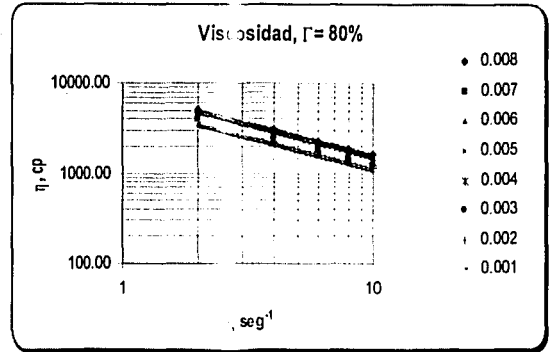
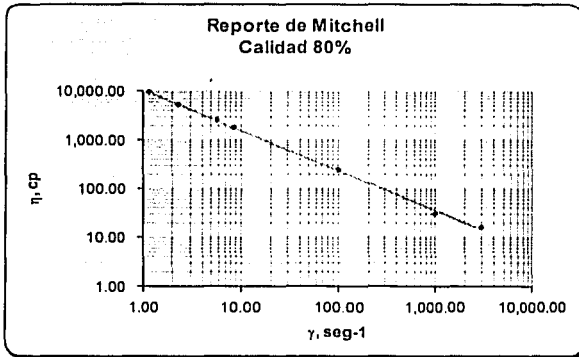


FIG. 4.4.21. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LA ESPUMA OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 80%

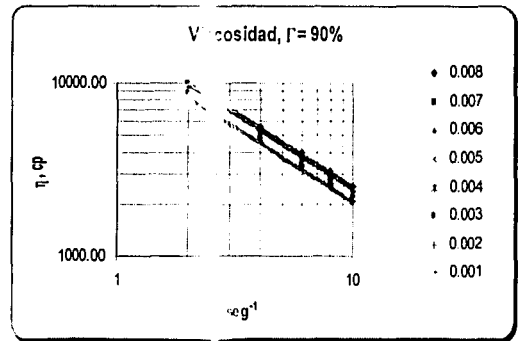
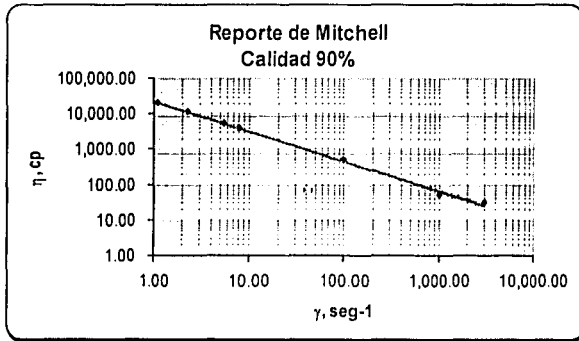


FIG. 4.4.22. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LA ESPUMA OBTENIDO CON EL FLUIDO ESPUMADO BPU (Cuadro azul) CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO REPORTADO POR MITCHELL (Cuadro rojo) PARA UNA ESPUMA DE CALIDAD 90%

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Los datos experimentales de viscosidad de una espuma son relativamente difíciles de obtener debido a la interacción que existe entre la estructura de la espuma, la geometría de medición y la reología. El hecho de usar un viscosímetro de geometría común como son las paletas de disco del viscosímetro Brookfield para determinar la viscosidad de la espuma, lleva consigo un error por supuesto mayor que aquel cuando se usa un viscosímetro capilar, no obstante, es posible obtener acercamientos respetables con geometrías comunes. A continuación se muestran las diferencias que se encontraron en el cálculo de la viscosidad, es posible notar que el error disminuye al aumentar la velocidad de corte.

**TABLA No. 5. COMPARACIÓN DE VALORES OBTENIDOS CON LOS REPORTADOS POR MITCHELL.**

$\Gamma$ , %	$\dot{\gamma}$ , seg <sup>-1</sup>	$\eta$ , cp	$\eta$ , Mitchell (cp)	Diferencia, %
60	40	16.51	20.13	17.97
	50	14.07	16.98	17.14
	60	12.34	14.77	16.46
70	40	79.62	92.17	13.61
	50	67.29	76.58	12.14
	60	58.64	65.82	10.91
80	40	496.79	504.82	1.59
	50	423.82	419.89	0.94
	60	372.23	361.22	3.05
90	40	683.12	832.14	17.91
	50	563.07	712.19	20.94
95	40	2,860.28	3,145.58	9.07
	50	2,355.79	2,569.12	8.30
	60	2,010.39	2,177.46	7.67

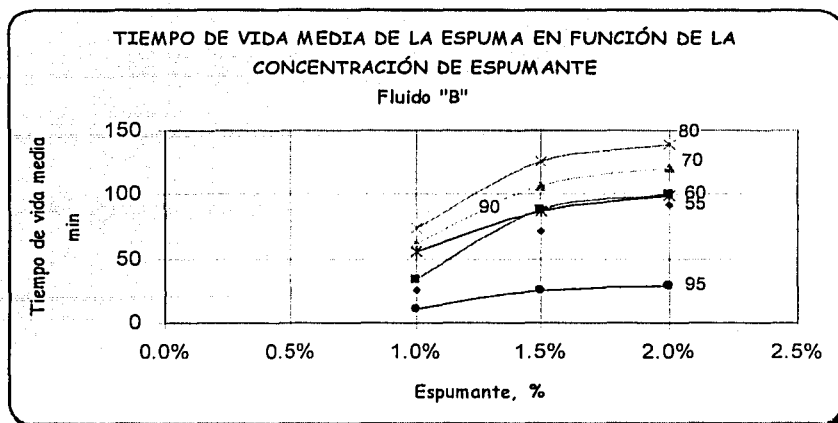
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- En cuanto a la estabilidad del fluido espumado BPU, es posible observar que la tendencia de vida media aumenta en forma proporcional a la concentración de agente espumante, llegando a un punto donde tiende a permanecer constante. La vida media de la espuma va en orden ascendente con respecto a la calidad, no obstante al llegar a la calidad 90 % tiende a disminuir la vida media.

**TABLA No. 6. TIEMPO DE VIDA MEDIA DEL FLUIDO ESPUMADO BPU EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AGENTE ESPUMANTE (TIPO DE FLUIDO "B").**

$\Gamma$ (%)	ESPUMANTE (%)	t (MIN)	V (ml)
55	1.0%	25.80	22.50
	1.5%	71.00	22.50
	2.0%	92.47	22.50
60	1.0%	33.98	20.00
	1.5%	88.20	20.00
	2.0%	100.40	20.00
70	1.0%	61.55	15.00
	1.5%	105.89	15.00
	2.0%	121.20	15.00
80	1.0%	73.73	10.00
	1.5%	126.36	10.00
	2.0%	139.09	10.00
90	1.0%	55.81	5.00
	1.5%	87.64	5.00
	2.0%	99.30	5.00
95	1.0%	11.45	2.50
	1.5%	25.20	2.50
	2.0%	29.50	2.50

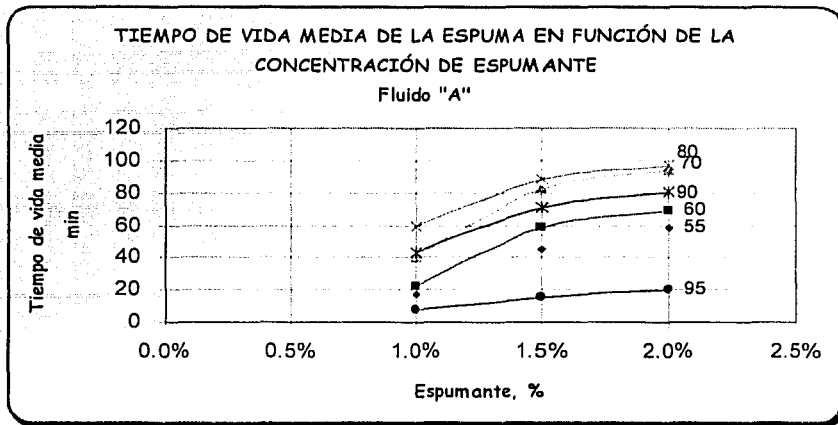
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**TABLA No. 7. TIEMPO DE VIDA MEDIA DEL FLUIDO ESPUMADO BPU EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AGENTE ESPUMANTE (TIPO DE FLUIDO "A").**

$\Gamma$ (%)	ESPUMANTE (%)	t (MIN)	V (ml)
55	1.0%	17.32	22.50
	1.5%	44.90	22.50
	2.0%	58.29	22.50
60	1.0%	21.75	20.00
	1.5%	58.20	20.00
	2.0%	69.48	22.50
70	1.0%	40.80	15.00
	1.5%	82.53	15.00
	2.0%	94.07	22.50
80	1.0%	59.71	10.00
	1.5%	88.13	10.00
	2.0%	96.54	22.50
90	1.0%	43.06	5.00
	1.5%	71.33	5.00
	2.0%	80.69	22.50
95	1.0%	7.36	2.50
	1.5%	15.10	2.50
	2.0%	19.97	2.50

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



#### 4.2. DISCUSIÓN.

- Okpobiri e Ikoku, 1986<sup>2</sup>, encontraron que la espuma se colapsa a niebla a una calidad de 94%, para velocidades de corte menores a 5000  $\text{seg}^{-1}$ , sin embargo persistirá por arriba de calidades del 96%, para velocidades de corte mayores a 5,000  $\text{seg}^{-1}$ . Sin embargo, en el trabajo de laboratorio, fue posible observar que a las velocidades de corte pequeñas que usamos con una calidad de 95% no se colapsó la espuma a niebla, sino que después de un tiempo se rompe la espuma, esto es, la calidad tiende a disminuir hasta separarse la fase líquida de la gaseosa.
- Si la calidad excede el 75%, el flujo es dominado por la deformación de las burbujas adyacentes, y la viscosidad de la espuma aumenta rápidamente con el incremento de la calidad<sup>2</sup>. Esto fue posible comprobarlo en las pruebas de laboratorio, concluyendo la siguiente gráfica.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<sup>2</sup> Okpobiri, G.A. and Ikoku, C.U.: "*Volumetric Requirements for Foam and Mist Drilling Operations*", SPEDE (February 1986) 71-88.



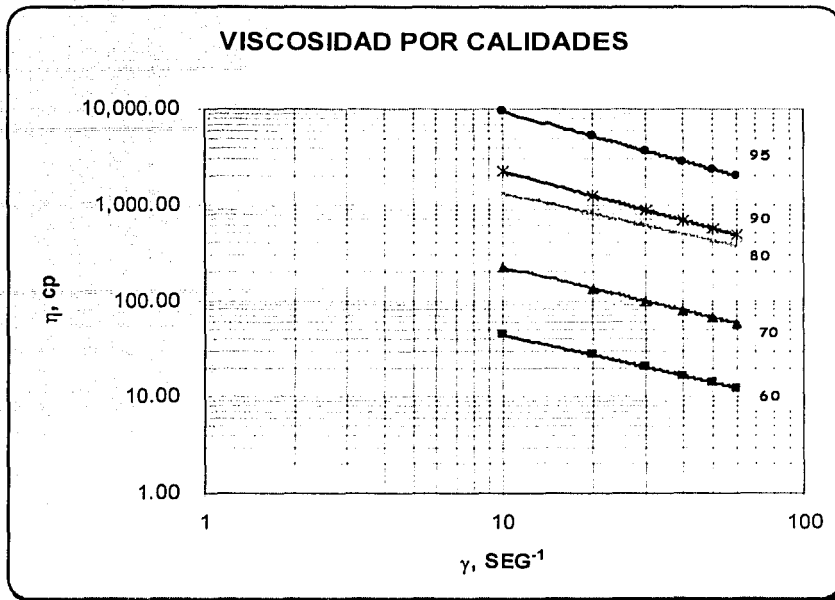


FIG. 4.4.17. GRÁFICA LOGARÍTMICA DE VELOCIDAD DE CORTE  $\gamma$  vs. VISCOSIDAD DE ESPUMA,  $\eta$ , QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES CALIDADES DE ESPUMA, DESPRECIANDO EL EFECTO DE CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO.

- La viscosidad de la espuma es muy independiente de la concentración del agente espumante en la fase líquida, al menos cuando se usan concentraciones típicas en operaciones de perforación con espumas<sup>3,4,5,6</sup>. Se realizaron varias pruebas cambiando la concentración de espumante para todas las calidades y no se observó un cambio significativo en la magnitud de la viscosidad, como se puede observar en las gráficas de viscosidad que se encuentran en la sección 4.1 de Resultados.
- Las graficas de viscosidad y esfuerzo de corte que se tomaron de comparación para este trabajo han sido las reportadas por Mitchell, aunque también Shangai e Ikoku,

<sup>3</sup> Beyer, A.H., Millhone, R.S. and Foote, R.W.: "Flor Behavior of Foam as a Well Circulating Fluid", paper SPE 3986 presented at the 1972 SPE Annual Fall Meeting, San Antonio, TX (October 1972).

<sup>4</sup> Mitchell, B.J.: "Test Data Fill Theory Gap on Using Foam as a Drilling Fluid", Oil and Gas J. (September 1971) 96-100.

<sup>5</sup> Clark, N.O. Special Report No. 6, Department of Scientific and Industrial Research, Her Majesty's Stationary Office, London (1947).

<sup>6</sup> Fried, A.N.: "The foam drive process for increasing the recovery of Oil", U.S. Bureau of Mines, Report of Investigation No. 5866 (1961).

1983<sup>7</sup>, reportaron valores para  $k$  y  $n$ , determinados en experimentos desarrollados usando una geometría anular. Estos datos cubrieron velocidades de corte desde 100 a 1000  $\text{seg}^{-1}$ . Reportaron viscosidades efectivas de 60 a 500 cp. Una vez más la viscosidad aumento al aumentar la calidad por arriba de 94%. Después de esto, la viscosidad disminuyó con el incremento de la calidad. Reflejando el rompimiento de la espuma a niebla. Ambos trabajos utilizaron una espuma estable. Esto indica que en cuanto a magnitud de esfuerzo de corte y viscosidad de la espuma no existe un cambio significativo al usar una espuma estable y una rígida. No obstante, la gran diferencia se pudo observar en la estabilidad de la espuma, la cual es mayor en una espuma rígida, esto implica que teóricamente, la capacidad de acarreo de esta espuma es mucho mejor que la que presenta una espuma estable.

- En espumas rígidas, el incremento de la viscosidad en la fase líquida parece mejorar la estructura de la espuma, tal vez haciendo más lento el drene por gravedad y ruptura de las paredes de cada burbuja.

### 4.3. CONCLUSIONES.

---

- En el capítulo 3, se presentó una breve explicación de los métodos disponibles para medir la reología de fluidos no-newtonianos complejos, como es el caso de las espumas, en presencia de resbamiento en las paredes. Al mismo tiempo, para el caso de la geometría con discos, se conjuntaron dos metodologías ya que se usó un viscosímetro Brookfield modelo R.V.T. con paletas de disco. Las lecturas tomadas del aparato se transforman en esfuerzo de corte usando la constante  $k_{0.1}$ , luego, con la

---

<sup>7</sup> Sanghani, V. and Ikoku, C.U.: "*Rheology of Foam and its Implications in Drilling and Cleanout Operations*", ASME paper AO-203 presented at the 1983 ASME Energy Sources technology Conference and Exhibition, Houston, TX, January 30-February 3.

pseudo-constante de Metzner-Otto  $k_{vN}$ , es posible calcular la velocidad de corte en  $\text{seg}^{-1}$ , misma que fue corregida por el resbalamiento. Así fue posible calcular la viscosidad de la espuma.

- Para contrarrestar el efecto del resbalamiento es necesario usar dos geometrías, pero es importante mantener constante la relación de radios de camisa contra bob.
- Los esfuerzos de corte encontrados en este trabajo experimental son del orden de aquellos publicados por Mitchell.
- Las viscosidades efectivas que se obtuvieron presenta un porcentaje de diferencia que varía entre 1 a 20 %.
- El fluido que presentó mayor estabilidad fue el que contenía 1.0% de polímero viscosificante, lo cual no precisamente es una contradicción con la teoría de espumas que establece que una espuma rígida contiene máximo un 0.2%, la interpretación que se le ha dado a este hecho es la calidad del polímero viscosificante, la cual varía de acuerdo al laboratorio que la fabrica. Es así que establecer una concentración fija de un material químico es relativo.
- Según la teoría de espumas, el punto donde el fluido deja de ser espuma para ser niebla está entre 94 y 97%, no obstante, se observó que al tratar de preparar una espuma del 97% fue imposible, debido a que al incorporar el aire con un agitador mecánico, a la fase líquida llega un momento en que la espuma en lugar de crecer, se rompe. Por tal razón, se trabajó un límite de espuma del 95%. Aún esta calidad fue poco más complicada de prepararla en laboratorio, ya que para las calidades anteriores (55, 60, 70, 80 y 90 %) era suficiente incorporar el aire a razón de 3000 rpm durante 15 min, mientras que para el caso de la calidad de 95% el tiempo para prepararla fue hasta 30 min para alcanzarla.
- La diferencia que se notó entre los dos tipos de fluido fue la estabilidad de la espuma, pues para el fluido A, la espuma era muy inestable para calidades de 55 y 60% se

rompía más rápido en comparación con las otras calidades. Con el fluido B, la espuma fue mucho más estable.

- Se Observó que la concentración de espumante no afecta la viscosidad de la espuma, no así la concentración de polímero viscosificante. Para la que la concentración de bentonita afecte de manera significativa la viscosidad de la espuma, tendría que ser mucho mayor a 3%.
- En el trabajo experimental de laboratorio no fue posible usar el viscosímetro rotacional Fann VG-35 para la medición de la reología del fluido espumado, debido a la falta de disponibilidad de material para poder cambiar a otro tamaño de bob y camisa, con el propósito de realizar la medición con dos geometrías y poder corregir por resbalamiento.
- El tipo de agente espumante fue aniónico que es altamente soluble en la mayoría de los líquidos, en la serie de pruebas que se realizaron variando la concentración de éste no se observó un comportamiento de disminución de la vida media, por lo menos en el rango de concentraciones sugeridas por la teoría de espumas. Aunque se sabe que existe un punto crítico de concentración de agente espumante donde arriba de este punto la vida media tiende a disminuir, sin embargo esta concentración no se encuentra en operaciones comunes de perforación con fluidos espumados. Para encontrar una concentración de espumante que disminuya la vida media de la espuma, pero que permita el acarreo de recortes desde el fondo del agujero tendría que probarse en condiciones reales de trabajo, con el propósito de evaluar las concentraciones de espumante con polímero. Cabe aclarar que a condiciones de presión y temperatura de fondo, la vida media de la espuma disminuye.

[Faint, illegible text covering the majority of the page]

# **BIBLIOGRAFÍA**

# ANEXOS

## PAGINACIÓN DISCONTINUA

## BIBLIOGRAFÍA

Tena Suck, E. A. y Turnbull Plaza, B., 2001. "Manual De Investigación Experimental, Elaboración De Tesis", México, D.F.: Plaza y Valdés.

Devereux, S., 1998. "Practical Well Planning And Drilling Manual" Tulsa, Oklahoma: PennWell.

Maurer Engineering Inc., Limited Updates (TR96-28), 1998: "Underbalanced Drilling and Completion Manual", Houston, TX.

Gas Research Institute., 1997. "Underbalanced Drilling Manual" Chicago, Illinois.: Gas Research Institute.

Khan, Saad A.; "Foams. Theory, Measurements and Applications"; Ser. V.57; Surfactant Sci.

Govier, G.W., Sc. D., Aziz, K., Ph. D.; "The flow of Complex Mixtures in Pipes"; Van Nostrand Reinhold Company; 1972.

Ann S. Yoshimura, Princeton U., Robert K. Prud'homme, Princeton U.: "Viscosity Measurements in the Presence of Wall Slip in Capillary, Couette, and Parallel-Disk Geometries"; SPE Reservoir Engineering, May 1988, SPE-14696.

Mitschka, P.: "Simple conversion of Brookfield R.V.T. readings into viscosity functions"; Rheol. Acta 21, 207-209 (1982), Institute of Chemical Process Fundamentals, Czechoslovak Academy of Sciences, Prague.

Mitchell B.J. Ph. D.; "Test data fill theory gap on using foam as a drilling fluid"; The Oil and Gas Journal, Sept. 6, 1971; Colorado School of Mines; Golden, Colo.

"Recommended Practice for Testing foam agents for mist drilling"; API RP 46, First edition, November 1966, American Petroleum Institute, Division of Production, Dallas, Texas.

Martins A.L., SPE, Lourenco A.M.F., Sá C.H.M., Silva Jr. V., Petrobras, 2001: **"Foam Rheology Characterization as a Tool for Predicting Pressures While Drilling**

**Offshore Wells in UBD Conditions"**, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam. The Netherlands. SPE/IADC- 67691.

Y.Rojas, S. Kakadjian, A. Aponte, R. Márquez, y G. Sánchez, PDVSA-Intevep.; **"Stability and Rheological Behavior of Aqueous Foams for Underbalanced Drilling"**; SPE-64999; SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in Houston, Texas, 13-16 february 2001.

A.H. Beyer, R.S., Millhone, R.W. Foote; **"Flow Behavior of Foam as a Well Circulating Fluid"**, SPE-3986, 1972.

Blackwell, B.F., Butler Sobolik, Keri.; **"An Experimental Investigation of Pressure Drop of Aqueous Foam in Laminar Tube Flow"**; Sandia National Laboratories; SAND85-1921.UC-66d, Printed april 1987.

Okpobiri, G.A., Ikoku, C.U.: **"Experimental Determination of Friction Factors for Mist and Foam Drilling and Well Cleanout Operations"**; Transactions of the AIME; Vol. 105, December 1983; 542-553 pp.

Pérez-Téllez, Carlos, SPE, Urbietta-López, Antonio and Banda-Morato, Roberto G., PEMEX-PEP: **"Bottomhole Pressure Measurements, Indispensable Tool for Optimizing Underbalanced Drilling Operations"**, OTC-15061, May 2003.

Millhone S. Ralph, Haskin, C.A. and Beyer A.H.: "Factors affecting foam Circulation in Oil Wells"; SPE-4001; SPE of AIME, Oct. 1972.

Cameron J.R.: **"Rheological Modeling and Scale-Up of a Delayed-Crosslinked Gel in Nonhomogeneous Flow"**, SPE, Amoco Production Co.; SPE-21858, SPE Production & Facilities, February 1993.

Cawiezal, K.E. and Niles, T.D.: **"Rheological Properties of Foam Fracturing fluids under Downhole Conditions"**; SPE-16191, 1987.

Svorstol, Saga Petroleum a.s., F. Vassenden, SPE, IKU Petroleum Research, and K. Mannhardt, SPE, Petroleum Recovery Institute: **"Laboratory Studies for Design of a Foam Pilot in the Snorre Field"**; SPE/DOE-35400, 1996.

Raza, S. H. and Marsden, S.S.: **"The Flow of Foam: I.Rheology and Streaming Potential"**; SPE-1205; Annual Fall Meeting Oct. 3-6 1965-Denver CO.



Lage, A.C.V.M., SPE, Petrobras, Fjelde, K.K., RF-Rogaland Research, and Time, R.W., SPE/Stavanger College and RF-Rogaland Research: **"Underbalanced Drilling Dynamics: Two-Phase Flow Modeling and Experiments"**, IADC/SPE-62743, Asia Pacific Drilling Technology, Kuala Lumpur, Malaysia 11-13 September 2000.

Kitsios, E., Kamphuis, H. and Quaresma, V., Petroleum Development Oman, Rovig, J.W., Oiltools Intl. Ltd., and Reynold E., Petroleum Development Oman: **"Underbalanced Drilling Through Oil Production Zones with Stable Foam in Oman"**, IADC/SPE-27525, Drilling Conference, Dallas, TX. February, 1994.

Boyun Guo, Ali Ghalambor, **"Gas Volume Requirements for Underbalanced Drilling, Deviated Holes"**, University of Louisiana at Lafayette, Edit. PennWell Co., Tulsa Oklahoma, 2002.

William C. Lyons, Bayum Guo, Frank A. Seidel, **"Air and Gas Drilling Manual"**, Second Edition, Edit. McGraw-Hill, 2001.



**ANEXOS**



**ANEXO A.**

Para flujo descendente en el interior de la tubería de perforación, la fracción másica de gas está definida como:

$$W_g = \frac{m_g}{m_g + m_l} \dots\dots\dots \text{Ec. (A-1)}$$

donde  $m_g$  y  $m_l$  es el gasto másico de gas y líquido, respectivamente.

Entonces, el volumen específico de la mezcla de espuma puede ser expresado como:

$$V = W_g V_g + (1 - W_g) V_l \dots\dots\dots \text{Ec. (A-2)}$$

donde  $V$ , volumen específico de la espuma

$V_g$ ,  $V_l$ , volumen específico del gas y del líquido, respectivamente.

De ahí, que combinando las ecuaciones A-1 y A-2, llegamos a la ecuación de estado para flujo descendente en el interior de la tubería:

$$V = \frac{a}{P} + b \dots\dots\dots \text{Ec. (A-3)}$$

Los coeficientes  $a$ ,  $b$  están definidos en la Tabla No. 4.

Para flujo ascendente en el espacio anular, la espuma es mezclada con recortes de formación. Presentándose así tres fases en la mezcla, por lo que las fracciones de masa de los tres componentes son:

$$W_g = \frac{m_g}{m_g + m_l + m_s}$$

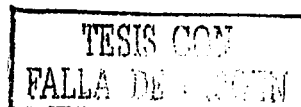
$$W_l = \frac{m_l}{m_g + m_l + m_s} \dots\dots\dots \text{Ec. (A-4)}$$

$$W_s = \frac{m_s}{m_g + m_l + m_s}$$

donde  $m_s$ , es el gasto másico de los recortes.

El volumen específico de la mezcla espuma/recortes puede ser expresada como:

$$V = W_g V_g + W_l V_l + W_s V_s \dots\dots\dots \text{Ec. (A-5)}$$



Combinando las ecuaciones (A-4) y (A-5) tendremos la ecuación de estado para flujo ascendente de espumas en el espacio anular.

$$V = \frac{a}{P} + b \dots\dots\dots \text{Ec. (A-6)}$$

Las funciones de la ecuación diferencial de balance de energía mecánica en el interior de la tubería de perforación y en el espacio anular son:

$$F_p(MD, VD, P) = \frac{S_p P^3 + \frac{2fabc^2}{25.8} P^2 + \frac{f}{25.8} a^2 c^2 P}{bP^3 + aP^2 - abc^2 P - a^2 c^2} \times \frac{1}{D} \dots\dots\dots \text{Ec. (A-7)}$$

donde:

$$S_p = \frac{f}{25.8} b^2 c^2 - D \frac{d(VD)}{d(MD)} \dots\dots\dots \text{Ec. (A-8)}$$

$$F_A(MD, VD, P) = \frac{S_A P^3 + \frac{2f.abc^2}{21.1} P^2 + \frac{f}{21.1} a^2 c^2 P}{bP^3 + aP^2 - abc^2 P - a^2 c^2} \times \frac{1}{D_h - D_p} \dots\dots\dots \text{Ec. (A-9)}$$

donde:

$$S_A = \frac{f}{21.1} b^2 c^2 - (D_h - D_p) \frac{d(VD)}{d(MD)} \dots\dots\dots \text{Ec. (A-10)}$$

**TABLA No. A-1.- COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES DE ESTADO PARA LAS ESPUMAS.**

Coefficientes	Interior de tubería	Anular	A través de barrena (c')
A	$W_g ZRT$ $M_g$	$W_g ZRT$ $M_g$	N/A
B	$(1 - W_g) V_l$	$W_l V_l + W_s V_s$	N/A
c ó c'	$\frac{4}{\pi D^2} (m_g + m_l)$	$\frac{4}{\pi (D_h^2 - D_p^2)} (m_g + m_l + m_s)$	$\frac{m_g + m_l}{A_f}$

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE LABORATORIO.

Fluido Base:

	<b>Concentración</b>
Agua	100 %
Bentonita	3.0 %
Sosa Cáustica	0.1 %
Polímero	0.2 %
<b>Espumante</b>	<b>1.0 %</b>

Viscosímetro Fann

$N_i$ (rpm)	<b>Fluido Líquido</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
600	13	14	14
300	7	10	10
200	7	6	7
100	4	6	5
6	3	3	3
3	2	2	2

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
14	0.33	0.58	0.04
9	3.00	1.73	0.19
7	0.33	0.58	0.09
5	1.00	1.00	0.20
3	0	0	0
2	0	0	0

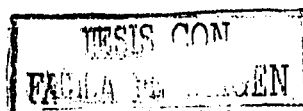
Viscosímetro Brookfield

$N_i$ (rpm)	<b>Espuma Calidad 55, Geometría 1</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	1	1
4	1	1	1
10	2	2	2
20	2	2	2

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
1	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
2	0	0	0

$N_i$ (rpm)	<b>Espuma Calidad 55, Geometría 2</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	1	1
4	1	1	1
10	2	1	1.5
20	2	2	2

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
1	0	0	0
1	0	0	0
1.5	0.25	0.50	0.33
2	0	0	0



$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 60, Geometría 1</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	2	1
4	2	3	1
10	2	3	2
20	3	3	2

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
1	0.33	0.58	0.43
2	1.00	1.00	0.50
2	0.33	0.58	0.25
2	0.33	0.58	0.22

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 60, Geometría 2</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	2	1	1
4	2	3	1
10	2	3	2
20	3	3	2

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
1	0.33	0.58	0.43
2	1.00	1.00	0.50
2	0.33	0.58	0.25
3	0.33	0.58	0.22

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 70, Geometría 1</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	7	9	6
4	8	8	9
10	11	14	13
20	13	12	13

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
7	2.33	1.53	0.21
8	0.33	0.58	0.07
13	2.33	1.53	0.12
13	0.33	0.58	0.05

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 70, Geometría 2</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	7	9	8
4	8	9	9
10	13	14	13
20	14	14	13

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
8	1.00	1.00	0.13
9	0.33	0.58	0.07
13	0.33	0.58	0.04
14	0.33	0.58	0.04

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 80, Geometría 1</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	15	13	14
4	22	22	20
10	27	24	26
20	38	32	38

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
14	1.00	1.00	0.07
21	1.33	1.15	0.05
26	2.33	1.53	0.06
36	12.00	3.46	0.10

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 80, Geometría 2		
2	11	17	17
4	16	16	15
10	22	26	26
20	28	28	33

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
15	12.00	3.46	0.23
16	0.33	0.58	0.04
25	5.33	2.31	0.09
30	8.33	2.89	0.10

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 90, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	41	41	39
4	42	45	45
10	55	59	59
20	65	65	65

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
40	1.33	1.15	0.03
44	3.00	1.73	0.04
58	5.33	2.31	0.04
65	0	0	0

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 90, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	39	36	39
4	44	43	43
10	54	55	55
20	62	62	61

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
38	3.00	1.73	0.05
43	0.33	0.58	0.01
55	0.33	0.58	0.01
62	0.33	0.58	0.01

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 95, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	41	41	42
4	43	45	47
10	55	59	55
20	56	58	58

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
41	0.33	0.58	0.01
45	4.00	2.00	0.04
56	5.33	2.31	0.04
57	1.33	1.15	0.02

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 95, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	39	36.5	37
4	44.5	44.5	47.5
10	46	47	46.5
20	56	55.5	56.5

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
38	1.75	1.32	0.04
46	3.00	1.73	0.04
47	0.25	0.50	0.01
56	0.25	0.50	0.01

TESIS CON  
ALLA DE C...

Fluido Base:

	<b>Concentración</b>
Agua	100 %
Bentonita	3.0 %
Sosa Cáustica	0.1 %
Polímero	0.2 %
<b>Espumante</b>	<b>1.5 %</b>

Viscosímetro Brookfield

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 55, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	1	1
4	1	1	1
10	2	2	2
20	2	2	2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
1	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
2	0	0	0

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 55, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	1	1
4	1	1	1
10	2	1	1.5
20	2	2	2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
1	0	0	0
1	0	0	0
1.5	0.25	0.50	0.33
2	0	0	0

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 60, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	2	2	1
4	2.5	3	2
10	2.5	3	2
20	3	3	2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
2	0.33	0.58	0.35
2.5	0.25	0.50	0.20
2.5	0.25	0.50	0.20
3	0.33	0.58	0.22

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 60, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	2	1	2
4	1.5	1.5	3
10	2	2.5	3
20	2	3	3

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
2	0.33	0.58	0.35
2	0.75	0.87	0.43
2.5	0.25	0.50	0.20
3	0.33	0.58	0.22



$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 70, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	7	8	6
4	9	8	9
10	12	13	13
20	16	12	13

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
7	1.00	1.00	0.14
9	0.33	0.58	0.07
13	0.33	0.58	0.05
14	4.33	2.08	0.15

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 70, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	7	8	8
4	9	9	9
10	14	14	13
20	14	14	13

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
8	0.33	0.58	0.08
9	0.00	0.00	0.00
14	0.33	0.58	0.04
14	0.33	0.58	0.04

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 80, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	15	16	14
4	21	22	20
10	27	25	28
20	36	37	36

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
15	1.00	1.00	0.07
21	1.00	1.00	0.05
27	2.33	1.53	0.06
36	0.33	0.58	0.02

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 80, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	13	16	17
4	18	17	15
10	22	26	26
20	31	28	33

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
15	4.33	2.08	0.14
17	2.33	1.53	0.09
25	5.33	2.31	0.09
31	6.33	2.52	0.08

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 90, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	41	41	43
4	43	45	46
10	57	60	59
20	65	66	65

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
42	1.33	1.15	0.03
49	2.33	1.53	0.03
59	2.33	1.53	0.03
65	0.33	0.58	0.01

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 90, Geometría 2		
2	40	37	39
4	45	42	43
10	54	55	55
20	62	63	63

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
39	2.33	1.53	0.04
43	2.33	1.53	0.04
55	0.33	0.58	0.01
63	0.33	0.58	0.01

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 95, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	43	41	42
4	42	47	47
10	56	59	55
20	58	60	59

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	$Cv$
42	1.00	1.00	0.02
45	8.33	2.89	0.06
57	4.33	2.08	0.04
59	1.00	1.00	0.02

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 95, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	38	40.0	40
4	44.5	44.5	47
10	51.5	48	49
20	56	59	59

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	$Cv$
39	1.33	1.15	0.03
45	2.08	1.44	0.03
49.5	3.25	1.80	0.04
58	3.00	1.73	0.03

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fluido Base:

	<b>Concentración</b>
Agua	100 %
Bentonita	3.0 %
Sosa Cáustica	0.1 %
Polímero	0.2 %
<b>Espumante</b>	<b>2.0 %</b>

Viscosímetro Brookfield

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 55, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	1	1
4	1	1	1
10	2	2	2
20	2	2	2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
1	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
2	0	0	0

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 55, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	1	1
4	1	1	1
10	2	1	1.5
20	2	2	2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
1	0	0	0
1	0	0	0
1.5	0.25	0.50	0.33
2	0	0	0

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 60, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	2	2	1
4	2	3	2
10	3	3	2
20	2	3	3

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
2	0.33	0.58	0.35
2	0.33	0.58	0.25
3	0.33	0.58	0.22
3	0.33	0.58	0.22

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 60, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	2	1	2
4	1.5	1.5	3
10	2	3	3
20	3	3	2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
2	0.33	0.58	0.35
2	0.75	0.87	0.43
3	0.33	0.58	0.22
3	0.33	0.58	0.22

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 70, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	7	9	7
4	9	8	9
10	12	14	15
20	16	12	13

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
8	1.33	1.15	0.15
9	0.33	0.58	0.07
14	2.33	1.53	0.11
14	4.33	2.08	0.15

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 70, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	7	8	8
4	12	9	9
10	14	14	13
20	15	15	15

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
8	0.33	0.58	0.08
10	3.00	1.73	0.17
14	0.33	0.58	0.04
15	0.00	0.00	0.00

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 80, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	19	18	17
4	21	22	20
10	30	28	28
20	37	37	36

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
18	1.00	1.00	0.06
21	1.00	1.00	0.05
29	1.33	1.15	0.04
37	0.33	0.58	0.02

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 80, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	15	16	15
4	20	19	17
10	25	26	27
20	31	28	33

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
15	0.33	0.58	0.04
19	2.33	1.53	0.08
26	1.00	1.00	0.04
31	6.33	2.52	0.08

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 90, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	41	41	42
4	45	47	48
10	57	60	59
20	67	66	65

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
41	0.33	1.58	0.01
47	2.33	1.53	0.03
59	2.33	1.53	0.03
66	1.00	1.00	0.02

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 90, Geometría 2</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	40	37	39
4	45	44	43
10	54	57	56
20	62	64	63

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
39	2.33	1.53	0.04
44	1.00	1.00	0.02
56	2.33	1.53	0.03
63	1.00	1.00	0.02

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 95, Geometría 1</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	43	41	42
4	49	47	47
10	56	57	55
20	59	60	59

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
42	1.00	1.00	0.02
47	2.33	1.53	0.03
56	1.00	1.00	0.02
59	0.33	0.58	0.01

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 95, Geometría 2</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	38	41	40
4	48	46	49
10	51	50.5	50
20	60	59	59

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
40	2.33	1.53	0.04
48	2.33	1.53	0.03
50.5	0.25	0.50	0.01
59	0.33	0.58	0.01

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fluido Base:

	<b>Concentración</b>
Agua	100 %
Bentonita	3.0 %
Sosa Cáustica	0.1 %
Polímero	1.0 %
<b>Espumante</b>	<b>1.0 %</b>

Viscosímetro Fann

$N_i$ (rpm)	<b>Fluido Líquido</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
600	46	48	45
300	24	27	27
200	19	19	18
100	10	14	11
6	2	2	3
3	2	2	2

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	s	cv
46	2.33	1.53	0.03
26	3.00	1.73	0.07
19	0.33	0.58	0.03
12	4.33	2.08	0.18
2	0.33	0.58	0.25
2	-	-	-

Viscosímetro Brookfield

$N_i$ (rpm)	<b>Espuma Calidad 55, Geometría 1</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	1	1
4	1.5	1	1.5
10	2	2	2
20	2	2	2

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	s	cv
1	0	0	0
1	0.08	0.29	0.22
2	0	0	0
2	0	0	0

$N_i$ (rpm)	<b>Espuma Calidad 55, Geometría 2</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	1	1
4	1	1	1
10	2.5	2.5	2.5
20	2.5	2.5	2.5

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	s	cv
1	0	0	0
1	0	0	0
1.5	0	0	0
2	0	0	0

$N_i$ (rpm)	<b>Espuma Calidad 60, Geometría 1</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	3	2	2.5
4	2	3	3
10	3	3.5	4
20	4	5	5

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	s	cv
2.5	0.25	0.50	0.20
3	0.33	0.58	0.22
3.5	0.25	0.50	0.14
5	0.33	0.58	0.12

TESIS CON  
 FALLA DE CALIDAD

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 60, Geometría 2</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	2	2	1.5
4	2	3	2.5
10	3	3	2
20	4	4.5	5

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
2	0.08	0.29	0.16
22.5	0.25	0.50	0.20
3	0.33	0.58	0.22
4.5	0.25	0.50	0.11

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 70, Geometría 1</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	14	16	16
4	21	19	18
10	22	23	23
20	24	27	27

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
15	1.33	1.15	0.08
19	2.33	1.53	0.08
23	0.33	0.58	0.03
26	3.0	1.73	0.07

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 70, Geometría 2</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	13	11	12
4	13	12	13
10	15	17	16
20	21	20	19

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
12	1.00	1.00	0.08
13	0.33	0.58	0.05
16	1.00	1.00	0.06
20	1.00	1.00	0.05

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 80, Geometría 1</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	23	22	21
4	29	26	27
10	37	34	34
20	39	39	39

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
22	1.00	1.00	0.05
27	2.33	1.53	0.06
35	3.00	1.73	0.05
39	0.00	0.00	0.00

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 80, Geometría 2</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	23	22	25
4	25	28	27
10	32	34	33
20	40	38	38

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
23	2.33	1.53	0.07
27	2.33	1.53	0.06
33	1.00	1.00	0.06
39	1.33	1.15	0.03

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 90, Geometría 1</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	11	14	14
4	15	15	13
10	20	17	16
20	21	20	19

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
13	3.00	1.73	0.13
14	1.33	1.15	0.08
18	4.33	2.08	0.12
20	1.00	1.00	0.05

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 90, Geometría 2</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	10	12	11
4	12	11	13
10	14	13	14
20	15	17	15

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
11	1.00	1.00	0.09
12	1.00	1.00	0.08
14	0.33	0.58	0.04
16	1.33	1.15	0.07

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 95, Geometría 1</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	60	63	62
4	63	63	64
10	70	72	70
20	80	77	77

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
62	2.33	1.53	0.02
63	0.33	0.58	0.01
71	1.33	1.15	0.02
78	3.00	1.73	0.02

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 95, Geometría 2</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	59	62	62
4	65	64	63
10	73	73	71.5
20	76.5	76.5	76.5

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
61	3.00	1.73	0.03
64	1.00	1.00	0.02
72.5	0.75	0.87	0.01
77	0.00	0.00	0.00

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Fluido Base:

	<b>Concentración</b>
Agua	100 %
Bentonita	3.0 %
Sosa Cáustica	0.1 %
Polímero	1.0 %
<b>Espumante</b>	<b>1.5 %</b>

Viscosímetro Brookfield

$N_i$ (rpm)	<b>Espuma Calidad 55, Geometría 1</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	1	1
4	1.5	1	1
10	2	2	2
20	2	2	2

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
1	0	0	0
1	0.08	0.29	0.25
2	0	0	0
2	0	0	0

$N_i$ (rpm)	<b>Espuma Calidad 55, Geometría 2</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	1	1	1
4	1	1	1
10	2	2.5	2
20	2.5	2.5	2.5

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
1	0	0	0
1	0	0	0
2	0.08	0.29	0.13
2.5	0	0	0

$N_i$ (rpm)	<b>Espuma Calidad 60, Geometría 1</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	4	2	3
4	4	4	3
10	3	4	4
20	4	5	5

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
3	1.00	1.00	0.33
3	0.33	0.58	0.16
4	0.33	0.58	0.16
5	0.33	0.58	0.12

$N_i$ (rpm)	<b>Espuma Calidad 60, Geometría 2</b>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	2	2	1.5
4	2	3	3
10	3	3	3
20	4	4	3

<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
2	0.08	0.29	0.16
3	0.33	0.58	0.22
3	0.00	0.00	0.00
4	0.33	0.58	0.13

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 70, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	17	18	16
4	20	20	18
10	25	23	23
20	24	26	27

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
17	1.00	1.00	0.06
19	1.33	1.15	0.6
24	1.33	1.15	0.05
26	2.33	1.53	0.06

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 70, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	14	13	12
4	14	11	13
10	15	18	18
20	21	20	21

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
13	1.00	1.00	0.08
13	2.33	1.53	0.12
17	3.00	1.73	0.10
21	0.33	0.58	0.03

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 80, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	23	25	24
4	29	27	27
10	36	36	34
20	40	39	39

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
24	1.00	1.00	0.04
28	1.33	1.15	0.04
35	1.33	1.15	0.03
40	0.33	0.58	0.01

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 80, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	25	23	24
4	25	28	27
10	33	34	33
20	40	41	38

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	cv
24	1.00	1.00	0.07
27	2.33	1.53	0.06
33	0.33	0.58	0.06
40	2.33	1.53	0.03

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 90, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	15	14	14
4	17	15	15
10	18	17	19
20	21	20	20

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
13	3.00	1.73	0.13
14	1.33	1.15	0.08
18	4.33	2.08	0.12
20	1.00	1.00	0.05

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 90, Geometría 2		
2	13	12	11
4	12	12	13
10	14	14	14
20	18	17	16

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
12	1.00	1.00	0.08
12	0.33	0.58	0.05
14	0.00	0.00	0.00
17	1.00	1.00	0.06

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 95, Geometría 1		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	61	62	62
4	64	66	64
10	74	76	73
20	79	80	78

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
62	0.33	0.58	0.01
65	1.33	1.15	0.02
74	2.33	1.53	0.02
79	1.00	1.00	0.01

$N_i$ (rpm)	Espuma Calidad 95, Geometría 2		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	61.5	61	62
4	66	65	67
10	77	76	75
20	78	79	78

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
61.5	0.25	0.50	0.01
66	1.00	1.00	0.02
76	1.00	1.00	0.01
78	0.33	0.58	0.01

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 90, Geometría 2</i>		
2	13	12	11
4	12	12	13
10	14	14	14
20	18	17	16

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
12	1.00	1.00	0.08
12	0.33	0.58	0.05
14	0.00	0.00	0.00
17	1.00	1.00	0.06

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 95, Geometría 1</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	61	62	62
4	64	66	64
10	74	76	73
20	79	80	78

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
62	0.33	0.58	0.01
65	1.33	1.15	0.02
74	2.33	1.53	0.02
79	1.00	1.00	0.01

$N_i$ (rpm)	<i>Espuma Calidad 95, Geometría 2</i>		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	61.5	61	62
4	66	65	67
10	77	76	75
20	78	79	78

ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
Media	Varianza	Desv. Estándar	Coef. De Variación
$\bar{X}$	$s^2$	$s$	Cv
61.5	0.25	0.50	0.01
66	1.00	1.00	0.02
76	1.00	1.00	0.01
78	0.33	0.58	0.01

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN