

# PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA CIVIL

## ESTADO DEL ARTE EN EL USO DE AGENTES REDUCTORES DE ARRASTRE PARA FACILITAR EL BOMBEO DE CRUDOS PESADOS

Sebastián Aguas Lozano

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

INGENIERÍA CIVIL

Bogotá D.C

2013

## AGRADECIMIENTOS

*“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa”.*

*Mahatma Gandhi.*

Agradezco a mis padres, Luis Alberto y María Juliana, que me inculcaron el amor a mi profesión y jamás dudaron de mis capacidades.

A mi tía Alejandra por su apoyo y colaboración en la estructuración del documento.

A mi asesor, Juan G. Saldarriaga por guiarme a través del proceso.

Gracias.



## Tabla de contenido

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	iv
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	ix
1. Introducción .....	1
2. Objetivos .....	3
2.1. Objetivo General .....	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. Marco teórico.....	4
3.1. Panorama de explotación de crudos pesados y extra pesados a nivel mundial.....	4
3.2. Distribución mundial de crudos pesados y extra pesados .....	6
3.3. Panorama colombiano de explotación de crudos pesados y extra pesados .....	6
3.4. Composición y clasificación de crudos.....	9
3.4.1. Clasificación por composición química .....	10
3.4.2. Clasificación según viscosidad y gravedad API° .....	11
3.5. Viscosidad.....	12
3.6. Turbulencia y escalas de medición.....	13
3.7. Reducción de arrastre .....	15
4. Métodos de transporte .....	16
4.1. Pre calentamiento del Crudo .....	16
4.2. Dilución.....	18
4.3. Refinamiento Previo.....	20
4.4. Flujo Anular .....	20
4.5. Emulsión .....	22
5. Agentes Reductores de Arrastre (DRAs) .....	28
5.1. Descripción general e historia.....	28
5.2. Surfactantes .....	29
5.2.1. Surfactantes Aniónicos.....	30



5.2.2.	Surfactantes Catiónicos.....	30
5.2.3.	Surfactantes No Iónicos.....	30
5.2.4.	Surfactantes Anfóteros .....	30
5.2.5.	Formación de Micelas .....	31
5.2.6.	Influencia de la temperatura en el comportamiento de la micela .....	37
5.2.7.	Formación de redes de micelas.....	41
5.2.8.	Deslizamiento de pared.....	46
5.2.9.	Influencia del número de Reynolds sobre el desempeño de los surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre .....	50
5.3.	Suspensión de fibras .....	56
5.3.1.	Suspensión de fibras heterogénea .....	63
5.3.2.	Suspensión de fibras homogénea .....	64
5.4.	Polímeros.....	82
5.4.1.	Fenómeno de reducción de arrastre en agentes poliméricos .....	83
6.	Viabilidad de los Agentes Reductores en la industria petrolera colombiana .....	95
6.1.	Ventajas de los Agentes Reductores de Arrastre.....	96
6.1.1.	Ventajas de la implementación de Surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre.....	97
6.1.2.	Ventajas de la implementación de Suspensiones de Fibras como Agentes Reductores de Arrastre .....	98
6.1.3.	Ventajas de la implementación de Polímeros como Agentes Reductores de Arrastre .....	98
6.2.	Desventajas de los Agentes Reductores de Arrastre .....	99
6.2.1.	Desventajas de la implementación de Surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre.....	99
6.2.2.	Desventajas de la implementación de Suspensiones de Fibras como Agentes Reductores de Arrastre .....	100
6.2.3.	Desventajas de la implementación de Polímeros como Agentes Reductores de Arrastre.....	101
6.3.	Viabilidad técnica de los Agentes Reductores de Arrastre .....	102
6.4.	Viabilidad económica de los Agentes Reductores de Arrastre .....	107
6.4.1.	Viabilidad económica de los Surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre	107



6.4.1.	Viabilidad económica de las Suspensiones de Fibras como Agentes Reductores de Arrastre.....	109
6.4.2.	Viabilidad económica de los Polímeros como Agentes Reductores de Arrastre ....	110
7.	Conclusiones y recomendaciones .....	113
7.1.	Conclusiones.....	113
7.2.	Recomendaciones .....	115
8.	REFERENCIAS.....	117



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3-1. Red de Oleoductos Colombiano. Fuente: Ecopetrol.....	8
Ilustración 3-2. Clasificación según viscosidad y gravedad API°. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).	12
Ilustración 4-1. Flujo Anular. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).....	21
Ilustración 4-2. Flujos Anulares inestables. Adaptada de: (Gosh, Mandal, Das, & Das, 2008). .....	21
Ilustración 4-3. Deposición de crudo en la pared de la tubería por efecto del Flujo Anular Bambú. Adaptada de: (Bai, Chen, & Renardy, 1997).....	22
Ilustración 4-4. Emulsión Crudo-Agua. Adaptada de: (Bohórquez, 2012). .....	22
Ilustración 4-5. Ejemplos de estructuras moleculares. A) asfalteno (adaptado del residuo del crudo Venezuela para una proporción de 510C, INTEVEP SA Tech. Rept, 1992); b) Resina (Athabasta tarsand Bitumen); c) Acido Napténico. Adaptada de: (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004). .....	23
Ilustración 4-6. Mecanismo de estabilización de emulsiones: capa de asfaltenos formando una interface crudo/agua. Adaptada de: (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004). .....	24
Ilustración 4-7. Relación ángulo de incidencia y emulsión formada. Adaptada de: (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004). .....	24
Ilustración 5-1. Micela compuesta por Surfactantes Anfóteros. Fuente: (Autor). .....	32
Ilustración 5-2. Fuerzas repulsivas en micelas cilíndricas formadas por Surfactantes Catiónicos. Fuente: (Autor).....	35
Ilustración 5-3. Tamaño de los parámetros de flexibilidad micela en función de la fracción volumétrica de surfactante. Adaptada de: (Ezrahi, Tuval, & Aserin, 2006).....	37
Ilustración 5-4. Efecto de una fuerza cortante generada por a través del torque de una barra sobre un fluido newtoniano y un fluido viscoelástico. Adaptada de: (Franck, 2007). .....	42
Ilustración 5-5. Representación del módulo complejo como combinación de dos vectores, que son el módulo elástico y viscoso. Adaptada de: (Quesada, 2008).....	44
Ilustración 5-6. Tubo formado por micelas circundantes. Fuente: (Autor). .....	47
Ilustración 5-7. Mecanismo de reptación. Fuente: (Autor).....	48
Ilustración 5-8. Representación gráfica del número de aglomeración. Adaptada de: (BEGHELLO, 1998). .....	58
Ilustración 5-9. Suspensión de fibras tipo I. Adaptada de: (Delfos René, 2011). .....	59
Ilustración 5-10. Suspensión de fibras tipo II. Adaptada de: (Delfos René, 2011). .....	59
Ilustración 5-11. Suspensión de fibras tipo III. Adaptada de: (Delfos René, 2011). .....	60
Ilustración 5-12. Efecto Slip. Fuente: (Autor). .....	66
Ilustración 5-13. Efecto de los vórtices en el perfil de velocidades. Basada en: (Bohórquez, 2012). .....	67
Ilustración 5-14. Movimiento de un <i>streak</i> hacia el centro de la tubería. Adaptada de: (Bohórquez, 2012). .....	68
Ilustración 5-15. Región de interacción comprendida entre el límite sólido y el límite inferior. Fuente: (Autor).....	71
Ilustración 5-16. Interacción partículas - vórtice. Fuente: (Autor).....	71



Ilustración 5-17. Interacción fibras - vórtice para $dv > dp$ . Fuente: (Autor). .....	72
Ilustración 5-18. Oposición al estiramiento de los vórtices padre. Fuente: (Autor). .....	87
Ilustración 5-19. Esfuerzos normales generados a partir del esfuerzo cortante. Fuente: (Autor). ..	88
Ilustración 5-20. Ángulo de aproximación del vórtice padre hacia la región turbulenta. Fuente: (Autor). .....	89
Ilustración 5-21. Reducción de arrastre en agentes poliméricos. Escenario DR=0%. Adaptada de: (Bohórquez, 2012). .....	90
Ilustración 5-22. Reducción de arrastre en agentes poliméricos. Escenario DR=18%. Adaptada de: (Bohórquez, 2012). .....	90
Ilustración 5-23. Reducción de arrastre en agentes poliméricos. Escenario DR=61%. Adaptada de: (Bohórquez, 2012). .....	91
Ilustración 6-1. Red de oleoductos de Colombia. Fuente: (OCENSA). .....	96
Ilustración 6-2. Esquema de una estación de bombeo típica. Fuente: (Autor). .....	103
Ilustración 6-3. Bomba Inyectora MP BTG/HX HILLMAN. Adaptada de: (HILLMANN, 2013). .....	104
Ilustración 6-4. Tanque sellado para la implementación de DRAs. Adaptada de: (Facultad de Ingeniería UBA, 2007). .....	104
Ilustración 6-5. Máquina ROTATOR de Lidem. Adaptada de: (LIDEM, 2013). .....	105
Ilustración 6-6. Bomba centrífuga K4L 50HP 3450 RPM 5X4B Novem. Adaptada de: (NOVEM, 2013). .....	106
Ilustración 6-7. Esquema de una estación de bombeo típica, con infraestructura para la aplicación de DRAs. Fuente: (Autor). .....	106



## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3-1. Distribución de fuentes de energía primaria en América Latina. Adaptada de: (González, 2012).....	5
Gráfica 3-2. Distribución de los recursos petroleros identificados hasta el 2003. Adaptada de: (Saniere, Hénaut, & Arguilier, 2004). .....	5
Gráfica 3-3. Producción de crudo en Colombia (KBPD). Adaptada de: (Cámara Colombiana de Servicios Petroleros, 2009).....	7
Gráfica 3-4. Producción de petróleo según el tipo de crudo. Adaptada de: (Cámara Colombiana de Servicios Petroleros, 2009).....	9
Gráfica 4-1. Efecto de la temperatura en la viscosidad de los crudos pesados. Adaptada de: (Bemani, Basma, Yaghi, & ali, 2010).....	17
Gráfica 4-2. Comportamiento de la viscosidad del crudo pesado diluido con Kerosene (T=30°). Adaptada de: (Bemani, Basma, Yaghi, & ali, 2010). .....	19
Gráfica 4-3. Comportamiento de la viscosidad del crudo pesado diluido con Crudo Liviano (T=30°). Adaptada de: (Bemani, Basma, Yaghi, & ali, 2010). .....	19
Gráfica 4-4. Capilaridad crítica (línea sólida) para la ruptura de gotas en función de la razón de viscosidades. Adaptada de: (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004). .....	26
Gráfica 4-5. Viscosidad de las emulsiones curdo/agua a diferentes tasas de cortante. Adaptada de: (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004).....	27
Gráfica 5-1. Zonas de estabilidad para la solución de Dodecilsulfato sódico (SDS) con NaCl. Adaptada de: (Zhou, Xu, Ma, Li, Wei, & Yu, 2011). .....	33
Gráfica 5-2. Zonas de estabilidad para la solución de Dodecilsulfato sódico (SDS) sin NaCl. Fuente: (Zhou, Xu, Ma, Li, Wei, & Yu, 2011). .....	34
Gráfica 5-3. Correlación de diagramas térmicos de flujo y torque aplicado para el mantenimiento de velocidad constante. Adaptada de: (Rodrigues, Ito, & Sabadini, 2011).....	39
Gráfica 5-4. Temperatura de rompimiento de micelas en relación con el grupo alquilo CH <sub>2</sub> para los surfactantes compuestos de Bromuro de alquiltrimetilamonio: <b>C14TAB, C16TAB, C18TAB</b> . Adaptada de: (Rodrigues, Ito, & Sabadini, 2011). .....	40
Gráfica 5-5. Reynolds crítico vs temperatura de la solución para diferentes concentraciones de Bromuro de alquiltrimetilamonio. Adaptada de: (Rodrigues, Ito, & Sabadini, 2011). .....	41
Gráfica 5-6. Correlación esfuerzo cortante, deformación (s) y esfuerzo normal para materiales viscoelásticos. Adaptada de: (Franck, 2007). .....	43
Gráfica 5-7. Viscosidad inicial y viscosidad de Plateau para diferentes tasas de aplicación de carga. Adaptada de: (Hu & Matthys, 1995). .....	45
Gráfica 5-8. Regímenes de módulo complejo en materiales viscoelásticos. Adaptada de: (Sunthar, 2006). .....	46
Gráfica 5-9. Regímenes de flujo de los surfactantes. Adaptada de: (F.-C. Li, 2005). .....	52
Gráfica 5-10. Comparación del perfil de velocidades de la solución de surfactantes y el agua para los Regímenes de flujo II, II y IV. Adaptada de: (F.-C. Li, 2005). .....	53





Gráfica 5-11. Comparación de las fluctuaciones de velocidad en dirección del flujo para los flujos de la solución de surfactante y agua. Adaptada de: (F.-C. Li, 2005). ..... 54

Gráfica 5-12. Comparación de las fluctuaciones de velocidad en dirección normal al flujo para los flujos de la solución de surfactante y agua. Adaptada de: (F.-C. Li, 2005). ..... 55

Gráfica 5-13. Efecto del diámetro de la tubería en el fenómeno de reducción de arrastre. Adaptada de: (SALEM, MANSOUR, & SYLVESTER, 2007). ..... 56

Gráfica 5-14. Efecto del número de aglomeración para suspensiones con diferentes valores de relación de aspecto. Adaptada de: (BEGHELLO, 1998), ..... 61

Gráfica 5-15. Efecto de la concentración de consistencia de masa en fibras con diferente relación de aspecto. Adaptada de: (BEGHELLO, 1998). ..... 61

Gráfica 5-16. Efecto de la relación de aspecto en la disminución de las pérdidas por fricción. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970). ..... 63

Gráfica 5-17. Comparación de curvas de pérdidas por fricción entre fluido (agua) con suspensión de fibras y fluido (agua) por sí solo. Adaptada de: (Derakhshandeh, Kerekes, Hatzikiriakos, & Bennington, 2011). ..... 65

Gráfica 5-18. Efecto de la concentración y relación de aspecto en suspensión de fibras de Nylon para una velocidad media de flujo de 8 p/s. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970). ..... 76

Gráfica 5-19. Efecto de la concentración y relación de aspecto en suspensión de fibras de Nylon para una velocidad media de flujo de 10 p/s. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970). ..... 77

Gráfica 5-20. Perfil de velocidad Turbulencia Newtoniana. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970). ..... 79

Gráfica 5-21. Perfil de velocidad Turbulencia Amortiguada. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970). ..... 79

Gráfica 5-22. Perfil de velocidad Turbulencia Amortiguada. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970). ..... 80

Gráfica 5-23. Perfil de velocidad Turbulencia de pistón. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970). ..... 80

Gráfica 5-24. Perfil de velocidad Turbulencia de pistón (Max DR). Adaptada de: (Kerekes R. , 1970). ..... 81

Gráfica 5-25. Perfil de velocidad para el flujo de pistón (no DR). Adaptada de: (Kerekes R. J., 1970). ..... 81

Gráfica 5-26. Perfil de velocidad para diferentes porcentajes de reducción de arrastre. Adaptada de: (DUBIEF, WHITE, TERRAPON, SHAQFEH, MOIN, & LELE, 2004). ..... 84

Gráfica 5-27. Fluctuaciones en dirección del flujo ( $u_x'$  +, símbolos despegados) y perpendiculares a este ( $u_y'$  +, símbolos unidos por líneas), para diferentes porcentajes de reducción de arrastre. Adaptada de: (DUBIEF, WHITE, TERRAPON, SHAQFEH, MOIN, & LELE, 2004). ..... 85

Gráfica 5-28. Efecto del diámetro en el fenómeno de reducción de arrastre de Agentes Poliméricos. Adaptada de: (VIRK, 1975). ..... 92

Gráfica 5-29. Efecto de la concentración en la reducción de arrastre. Adaptada de: (VIRK, 1975). 94

Gráfica 6-1. Desempeño Extreme Power 1000. Adaptada de: (OCENSA, 2012). ..... 111



## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 3-1. Producción por cuenca y su participación total nacional. Adaptada de: (Cámara Colombiana de Servicios Petroleros, 2009). .....	7
Tabla 3-2. Clasificación por composición química. Adaptada de: (SPEIGHT, 2002).....	10
Tabla 3-3. Zonas de flujo medidas en términos de "Unidades de Pared" para el régimen de flujo turbulento. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).....	14
Tabla 5-1. Efecto del régimen de flujo en la efectividad de reducción de arrastre. Adaptada de: (Jubran, Zurigat, & Goosen, 2005). .....	29
Tabla 5-2. Parámetros de flujo. Adaptada de: (F.-C. Li, 2005). .....	52
Tabla 5-3. Reducción de fricción en suspensiones de fibras sintéticas. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970). .....	62
Tabla 5-4. Tipos de fibras experimentales. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).....	75
Tabla 5-5. Coeficientes K1 y K2. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).....	77
Tabla 5-6. Suspensión de fibras utilizada para el cálculo de perfiles de velocidad. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).....	78
Tabla 5-7. Polímeros solubles y no solubles en agua. Fuente: (Bohórquez, 2012).....	83
Figura 3-1. Distribución geográfica de crudos pesados, extra pesados y bitumen. Adaptada de: (Saniere, Hénaut, & Arguilier, 2004). .....	6
Figura 6-1. Productos producidos por Phillips Specialty Products Inc. Adaptada de: (Bohórquez, 2012). .....	111



## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-1. Índice de correlación para clasificación química. ....	11
Ecuación 3-2. Gravedad API° .....	11
Ecuación 3-3. Viscosidad Dinámica. ....	12
Ecuación 3-4. Viscosidad Cinemática. ....	13
Ecuación 3-5. Distancia desde la pared medida en "Unidades de Pared" .....	13
Ecuación 3-6. Escala de longitud viscosa.....	14
Ecuación 3-7. Velocidad de corte.....	14
Ecuación 3-8. Reducción de Arrastre bajo la comparación de factores de fricción.....	15
Ecuación 3-9. Reducción de Arrastre bajo la comparación de las pérdidas de presión. ....	15
Ecuación 3-10. Reducción de Arrastre bajo la comparación de esfuerzos cortantes en la pared de la tubería.....	16
Ecuación 4-1. Capilaridad.....	25
Ecuación 4-2. Razón de viscosidades. ....	25
Ecuación 4-3. Velocidad de sedimentación de gotas.....	26
Ecuación 5-1. Reducción de arrastre.....	28
Ecuación 5-2. Reducción de arrastre porcentual. ....	28
Ecuación 5-3. Parámetro de empaquetado de micelas. ....	31
Ecuación 5-4. Longitud total de micela no iónica. ....	35
Ecuación 5-5. Longitud total de micela iónica.....	36
Ecuación 5-6. Energía electrostática de la micela.....	36
Ecuación 5-7. Longitud de persistencia.....	36
Ecuación 5-8. Diferencia de esfuerzos normales. ....	43
Ecuación 5-9. Módulo complejo de materiales viscoelásticos.....	44
Ecuación 5-10. Tiempo de reptación.....	48
Ecuación 5-11. Tiempo de escisión reversible. ....	49
Ecuación 5-12. Relajación del cortante ( $tb \gg trep$ ). ....	49
Ecuación 5-13. Relajación del cortante ( $trep \gg tb$ ). ....	49
Ecuación 5-14. Tiempo de relajación combinado. ....	50
Ecuación 5-15. Colebrook-Withe. ....	50
Ecuación 5-16. Darcy Weisbach. ....	51
Ecuación 5-17. Factor de fricción. ....	51
Ecuación 5-18. Concentración de suspensión de fibras.....	57
Ecuación 5-19. Concentración crítica de colisión de fibras.....	57
Ecuación 5-20. Número de aglomeración de fibras basado en la concentración volumétrica. ....	58
Ecuación 5-21. Número de aglomeración de fibras basado en la concentración de consistencia de masa. ....	58
Ecuación 5-22. Relación de aspecto de fibras.....	60
Ecuación 5-23. Número de Reynolds turbulento con base en la longitud de la fibra.....	68



Ecuación 5-24. Área superficial total proyectada en la región de interacción. ....	72
Ecuación 5-25. Concentración de la suspensión en la región de interacción. ....	73
Ecuación 5-26. Frecuencia de colisiones entre fibras. ....	73
Ecuación 5-27. Frecuencia de colisiones entre fibras. ....	73
Ecuación 5-28. Concentración de la suspensión en la región de interacción. ....	73
Ecuación 5-29. Área superficial total proyectada en la región de interacción. ....	73
Ecuación 5-30. Número total de fibras en la región de interacción. ....	74
Ecuación 5-31. Densidad de fibras. ....	74
Ecuación 5-32. Volumen transversal de la región de interacción. ....	74
Ecuación 5-33. Reducción de arrastre en Suspensión de fibras Discontinua, para $dv > dp$ . ....	74
Ecuación 5-34. Reducción de arrastre en Suspensión de fibras Discontinua, para $dv > dp$ . ....	75
Ecuación 5-35. Reducción de arrastre en suspensiones de fibras de nylon. ....	78
Ecuación 5-36. Viscosidad de elongación. ....	86
Ecuación 5-37. Régimen polimérico. ....	93
Ecuación 5-38. Asíntota de máxima reducción de Virk. ....	93
Ecuación 5-39. Coeficiente de fricción. ....	93
Ecuación 6-1. Molaridad ....	107
Ecuación 6-2. Moles de soluto ....	107



## 1. Introducción

En los últimos años la demanda energética se ha disparado considerablemente a causa de gran variedad de motivos, entre ellos el crecimiento poblacional incontrolado. De igual manera, a fin de suplir dicha demanda, la oferta energética se ha incrementado drásticamente a nivel mundial. Sin embargo no es un secreto que vivimos en un mundo finito, donde las principales fuentes de recursos energéticos son de carácter no renovable, por ende el aprovechamiento y transformación de dichos recursos naturales está ligado al agotamiento de los mismos.

En una sociedad mundial donde más del 40% de los recursos energéticos provienen de fuentes petroleras, para las cuales según los medios de comunicación, de manera polémica y alarmante expresan la existencia de reservas útiles para los próximos 25 a 30 años, es incuestionable la aproximación de una crisis energética mundial. El problema radica en cómo reemplazar en un futuro los recursos provenientes de los yacimientos de crudo. Indudablemente, gran cantidad de alternativas energéticas han surgido como solución a la crisis próxima, entre las más populares se encuentran las energías limpias provenientes de recursos renovables, tales como la hidroelectricidad, energía solar, energía geotérmica, energía eólica, etc. Sin embargo la oferta proveniente de dichas fuentes se calcula capaz de suplir en un futuro, aproximadamente el 6% de la demanda mundial, es decir, aun si se utilizaran este tipo de fuentes se tendría un déficit de un poco más del 34% de la energía total demandada mundialmente, entonces la crisis no sería evitada.

El panorama no es del todo negativo, pues además de los recursos renovables, existen otro tipo de fuentes energéticas como las reservas de crudos pesados y extra pesados; pero, ¿no que las reservas petroleras tendrían una vida útil de 25 a 30 años?, la respuesta a esta pregunta afortunadamente es negativa, ya que aunque existen reservas petroleras para los próximos 25 a 30 años, estas corresponden exclusivamente a crudos livianos. Las reservas de crudos pesados y extra pesados actualmente equivalen a aproximadamente la suma entre la cantidad total de crudo liviano explotada hasta el presente año y las reservas actuales del mismo. Entonces, ¿por qué no se han explotado este tipo de crudos a lo largo del tiempo?; la razón principal es que a diferencia de los crudos livianos, los crudos pesados y extra pesados son mucho más viscosos, por lo cual el procedimiento de extracción, refinación, y transporte es mucho más costoso. Esta idea volvió inatractivo la explotación de los crudos pesados y extra pesados en el auge de la industria petrolera, pues era mucho más rentable explotar otros tipos de crudo.

Actualmente existe gran interés por la explotación de crudos pesados y extra pesados para dar fin a la idea de una crisis energética; sin embargo existen diferentes problemáticas que limitan el proceso. Una de estas problemáticas tiene que ver con el transporte de este tipo de crudos bajo la modalidad del bombeo a través de un sistema de oleoductos; dado que este tipo de crudos son demasiado viscosos, oponen mucha resistencia al bombeo, por lo cual se vuelve necesaria la utilización de gran cantidad de energía volviéndolo un proceso poco rentable e ineficiente.



A lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes mecanismos mediante los cuales se busca facilitar el bombeo de los crudos pesados y extra pesados. Actualmente existen diferentes metodologías que permiten disminuir la energía de bombeo, pero un tipo de mecanismo en especial ha tomado fuerza en los últimos años, se le denomina Agentes Reductores de Arrastre (DRA por sus siglas en inglés), y hacen referencia a la inyección de sustancias naturales o sintéticas al flujo en tuberías presurizadas (oleoductos), con el fin de atenuar las estructuras turbulentas, disminuyendo así las pérdidas por fricción y por ende la energía necesaria para el bombeo.

En el presente proyecto de grado se entenderá el comportamiento de los Agentes Reductores de Arrastre, utilizados para facilitar el bombeo de crudos pesados y extra pesados. De igual forma se indagará sobre los diferentes mecanismos a través de los cuales es posible la atenuación de las estructuras turbulentas en el flujo presurizado de tuberías, y se analizará la viabilidad de aplicación de los Agentes Reductores de Arrastre en la industria petrolera de Colombia.

Se iniciará con un recorrido mundial del estado de las reservas de crudo, lugares de explotación y cantidad de producción, con el fin de hacerse a la idea de un panorama real de la industria petrolera mundial.

Posteriormente se mostrarán y explicarán las diferentes técnicas tradicionales, empleadas para reducir los efectos de la viscosidad en el bombeo de crudos pesados, antes de la aparición de los Agentes Reductores de Arrastre. Se plantearán las ventajas y desventajas de dichas técnicas.

Luego se hará una revisión bibliográfica sobre el estado de los Agentes Reductores de Arrastre a nivel mundial, aclarando los mecanismos mediante los cuales es posible la atenuación de las estructuras turbulentas, las variables que determinan el comportamiento y desempeño en el flujo, las metodologías de inyección al flujo y las eficiencias obtenidas. Esto se fundamentará sobre ensayos experimentales encontrados en la literatura, que se conocen fueron realizados por diferentes autores conocedores del tema.

Finalmente se realizará una comparación de la viabilidad, desde el punto de vista técnico y económico de los Agentes Reductores de Arrastre, con un enfoque a la industria petrolera de Colombia.



## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Entender y comparar el comportamiento de los Agentes Reductores de Arrastre, utilizados en la industria petrolera para facilitar el bombeo de crudos pesados.

### 2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos nombrados a continuación son parte de una metodología que busca cumplir a cabalidad el objetivo general:

- Entender el entorno de la industria petrolera y sus necesidades actuales, bajo la problemática del constante agotamiento de los recursos energéticos y la reciente explotación de nuevos recursos tales como los crudos pesados y extra pesados.
- Observar la distribución mundial de las fuentes de crudo pesado y extra pesado, además de las cifras que hacen atractiva la explotación de estos tipos de crudo.
- Conocer la composición general de los crudos pesados y extra pesados y sus diferencias respecto a los crudos livianos, con el fin de entender la razón de su compleja explotación y las dificultades que genera en el transporte a través del sistema de oleoductos.
- Indagar sobre las diferentes metodologías tradicionales utilizadas para el bombeo de crudos pesados a través de oleoductos, analizando las ventajas, desventajas y eficiencia de la implementación de las mismas.
- Comprender los distintos fenómenos que ocurren a nivel de flujo durante el transporte de los crudos pesados y extra pesados a lo largo de un oleoducto, haciendo énfasis en aquellos que representan altas pérdidas de presión al sistema.
- Conocer la clasificación y composición de los Agentes Reductores de Arrastre utilizados para facilitar el bombeo de crudos pesados y extra pesados en la industria petrolera actual, a nivel mundial.
- Evaluar las características y el funcionamiento de los agentes reductores de arrastre cuando son sometidos al flujo presurizado dentro del sistema de oleoductos.
- Conocer las variables que definen el comportamiento y la eficiencia de los Agentes Reductores de Arrastre cuando son sometidos al flujo presurizado dentro del sistema de oleoductos.
- Analizar y comprender los mecanismos mediante los cuales los Agentes Reductores de Arrastre logran atenuar las diferentes estructuras turbulentas, generando una disminución en la disipación de energía.
- Identificar y comparar las ventajas y desventajas en cuanto a costo, manipulación y eficiencia, en el uso de los Agentes Reductores de Arrastre. Destacando aquellos que puedan ser empleados en la industria petrolera colombiana.



### 3. Marco teórico

#### 3.1. Panorama de explotación de crudos pesados y extra pesados a nivel mundial

En las últimas décadas la realidad mundial ha sido impactada por los avances científicos, tecnológicos, sociales y económicos que han permitido el desarrollo de la medicina, las comunicaciones, la ingeniería, la explotación más eficiente de los recursos naturales y exploración de fuentes alternativas de energía. Puede decirse que en general se ha avanzado en el dominio de nuevas técnicas y descubrimiento de vías novedosas para solucionar problemas que antiguamente afectaban la calidad y acortaban la esperanza de vida, avances que se reflejan en poblaciones con una esperanza de vida más larga y disminución notable de niveles de mortalidad, por el mismo mejoramiento de las condiciones de salubridad y saneamiento básico.

Este cambio en los niveles de vida que se traduce en la prosperidad de países emergentes, incorporando grandes sectores poblacionales a la esfera de un consumo muy por encima de lo histórico, jalona una producción desmesurada de bienes y servicios con la que se pretende satisfacer la creciente demanda de estos sectores consumistas, especialmente urbanos. Esto dispara de forma abusiva la explotación de recursos naturales, hasta el punto de que las Naciones Unidas en su informe ambiental de 2011, lanzaron una alerta sobre estos patrones desbocados de consumo, consignando lo siguiente:

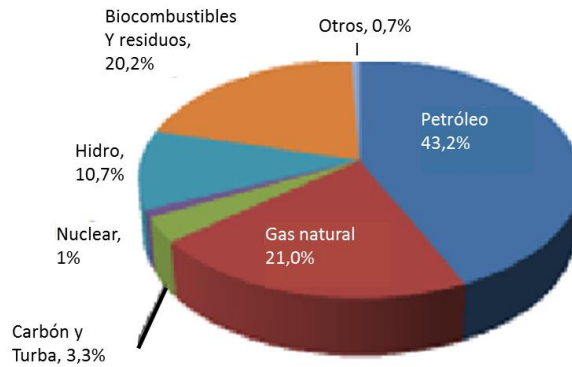
“Con el crecimiento de la población y la prosperidad, especialmente en países en desarrollo, la expectativa de niveles mucho más altos de consumo de recursos va **“mucho más allá de lo sostenible”** si se tiene en cuenta que todos los recursos del mundo son finitos”.

Igualmente el informe advierte que el mundo se está quedando sin fuentes baratas y de alta calidad de algunos materiales esenciales como el petróleo, el cobre y el oro, cuyos suministros requieren, a su vez, volúmenes, cada vez más altos, de combustibles fósiles y de agua dulce para su producción. El párrafo más inquietante de este informe señala lo siguiente: “En el 2050, la humanidad podría devorar alrededor de 140 millones de toneladas de minerales, combustibles fósiles y de biomasa al año, tres veces su apetito actual”. A ese ritmo de consumo se necesitarán dos planetas Tierra para atender la demanda creciente.

Uno de los indicadores de este ritmo de producción y consumo es el de la demanda de energía, el cual remite a un preocupante panorama energético. Según el US Department of Energy, el International Energy Agency (IEA) y el World Energy Council, la demanda de energía primaria crecerá alrededor del 66% para el año 2030, un crecimiento promedio de 1.7% anual. No obstante, es de resaltar que en la mayoría de los países, la principal fuente de energía primaria es el petróleo, como es el caso de los países de América Latina, para los cuales aproximadamente el 43.2% de la energía primaria cumple esta descripción (Gráfica 3-1). Con base en estas predicciones, la explotación de crudos pesados y extra pesados surge como una alternativa para

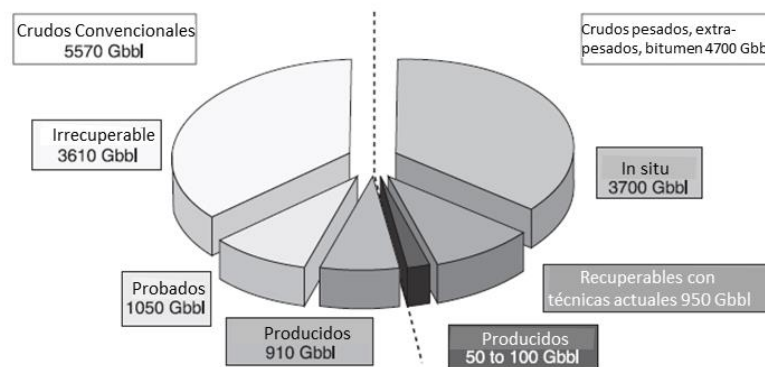


suplir esta necesidad; de acuerdo con la IEA la influencia de este tipo de hidrocarburos ha venido creciendo desde el inicio del siglo y se prevé que para el año 2030 esta alternativa represente 15% de la energía primaria proveniente de recursos petroleros.



**Gráfica 3-1. Distribución de fuentes de energía primaria en América Latina. Adaptada de: (González, 2012)**

La alternativa de los crudos pesados responde al conocimiento previo de las amplias reservas situadas a lo largo del globo terráqueo, y la difícil situación de los crudos convencionales, de los cuales forman parte los crudos livianos y medios. Los volúmenes identificados de crudos pesados y extra pesados se estiman en 4800 Gbbl<sup>1</sup>, lo que equivale al total de crudos convencionales descubiertos hasta la fecha (Saniere, Hénaut, & Arguilier, 2004) . Aunque existe pleno conocimiento de las importantes reservas de este tipo de crudos, tan solo entre el 1% y el 2% del volumen ha sido explotado (Gráfica 3-2); esto se debe a que la explotación de este fluido altamente viscoso requiere de una alta inversión debido a que el costo directo de su explotación es el doble del costo de un fluido convencional (crudos livianos y medianos).



**Gráfica 3-2. Distribución de los recursos petroleros identificados hasta el 2003. Adaptada de: (Saniere, Hénaut, & Arguilier, 2004).**

<sup>1</sup> Unidad de medida de reservas correspondiente a Millones de Barriles.

### 3.2. Distribución mundial de crudos pesados y extra pesados

De las reservas de crudos pesados y extra pesados, el 87% corresponde a crudos extra pesados y bitumen; las mayores reservas, aproximadamente el 78%, se encuentran en Latinoamérica, Norte América y Asia occidental. Esta distribución convierte a América en el mayor aportante a la producción de crudos pesados, principalmente Canadá, Venezuela, Estados Unidos y México, cuatro países que concentran aproximadamente el 60% de la producción mundial de crudos pesados y extra pesados, el equivalente al 4.2% de la producción mundial total de crudos (Figura 3-1).

La situación antes descrita resume el panorama mundial de la explotación actual de crudos, situación que difiere del caso particular de la industria petrolera colombiana en el presente, panorama que a continuación se relaciona.

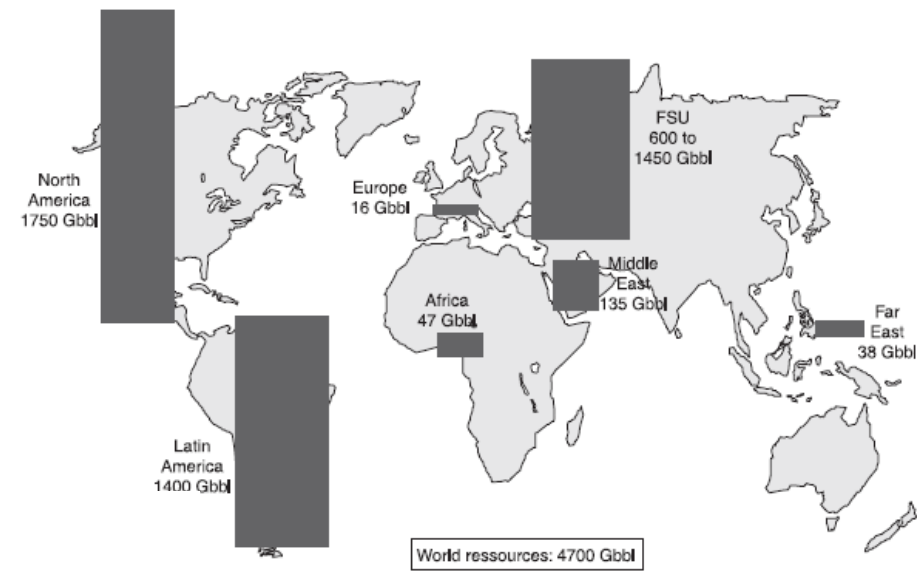
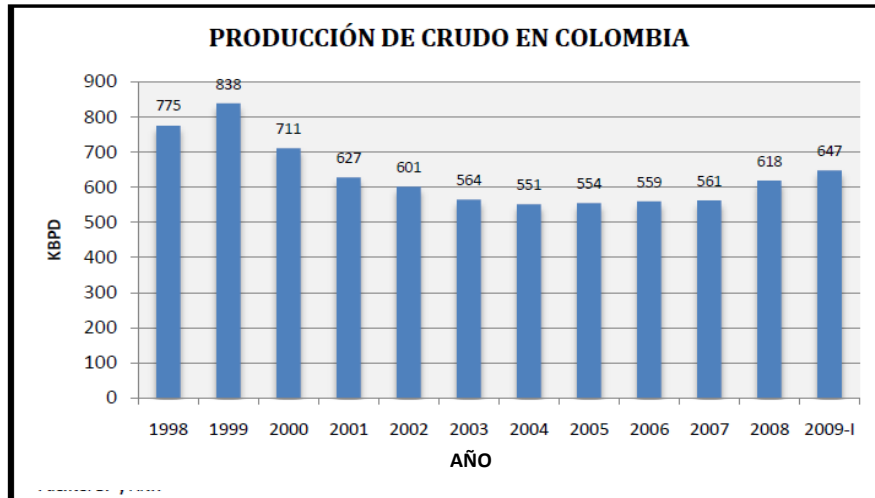


Figura 3-1. Distribución geográfica de crudos pesados, extra pesados y bitumen. Adaptada de: (Saniere, Hénaut, & Arguilier, 2004).

### 3.3. Panorama colombiano de explotación de crudos pesados y extra pesados

Colombia es el cuarto país productor de petróleo de América latina, después de Venezuela, México y Brasil; casi el 42% de su energía primaria es extraída de este producto. En los últimos años la producción de petróleo se ha incrementado, respondiendo a factores como el estímulo a la inversión extranjera en el sector petrolero y el impulso que generó la creación de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) en 2004. Precisamente a partir de 2004 se da la recuperación lenta pero sostenida de la producción petrolera, aunque los volúmenes siguen estando por debajo

del pico alto que significó el año 1999 (838 Kbpd<sup>2</sup>) (Gráfica 3-3), año al cual siguió un lustro de reducción significativa de la producción (1999-2004).



Gráfica 3-3. Producción de crudo en Colombia (KBPD). Adaptada de: (Cámara Colombiana de Servicios Petroleros, 2009).

En Colombia se están explotando 7 cuencas sedimentarias de las 23 existentes, siendo las cuencas de los Llanos Orientales y del Valle Medio del Magdalena las principales productoras, aportando alrededor del 80% de la producción total nacional (Cámara Colombiana de Servicios Petroleros, 2009). En la siguiente tabla se muestran las 7 cuencas sedimentarias y sus producciones para el año 2009:

Tabla 3-1. Producción por cuenca y su participación total nacional. Adaptada de: (Cámara Colombiana de Servicios Petroleros, 2009).

PRODUCCIÓN POR CUENCA Y SU PARTICIPACIÓN EN LA PRODUCCIÓN TOTAL NACIONAL		
CUENCA	P.C (BPD)	P.P.N (%)
Caguán-Putumayo	24.000	3,75%
Catatumbo	3.283	0,51%
Cordillera Oriental	79	0,01%
Llanos Orientales	425.231	66,45%
Valle Inferior del Magdalena	458	0,07%
Valle Medio del Magdalena	98.687	15,42%
Valle Superior del Magdalena	88.149	13,78%
<b>Total</b>	<b>639.887</b>	<b>100%</b>

P.C: Producción por cuenca

P.P.N: Participación en la producción total nacional

<sup>2</sup> Unidad de medida de producción petrolera que significa miles de barriles diarios.

A lo largo de las cuencas colombianas existe gran diversidad de crudos, desde crudos livianos hasta extra pesados y bitumen, esta clasificación depende de la gravedad API<sup>3</sup>. Los crudos encontrados en estas cuencas varía desde los 63° API (Liviano), crudo hallado en el campo Cerro Gordo, el cual se encuentra ubicado en la cuenca Catatumbo en el departamento de Norte de Santander, hasta los 0,92° API (Bitumen), crudo hallado en el campo Valdivia-Almagro, el cual está en explotación y está ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales en el departamento del Meta (Cámara Colombiana de Servicios Petroleros, 2009).

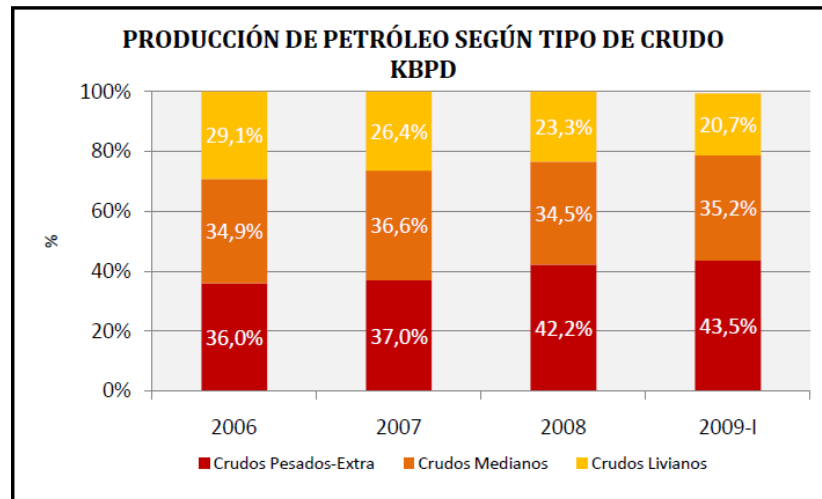
Los indicadores más recientes expuestos por Ecopetrol corresponden a 2011, año para el cual se estaban produciendo 914 Kbpd, lo que corresponde a un incremento en la producción del 30% respecto al año 2009, y un incremento histórico del 9.1% respecto a la mayor producción registrada en Colombia correspondiente al año 1999. Parte de este crudo producido se exporta, y parte se refina para extraer derivados como gasolina, lubricantes y asfaltos entre otros. Para el año 2011 Ecopetrol refinaba 302,8 Kbpd, equivalente al 33% del crudo producido, el otro 77% era transportado a través del sistema de oleoductos colombiano (Ilustración 3-1) hasta el puerto de Coveñas.



Ilustración 3-1. Red de Oleoductos Colombiano. Fuente: Ecopetrol.

<sup>3</sup> American Petroleum Institute: medida de densidad que en comparación con el agua precisa cuan pesado es el petróleo.

La configuración del crudo producido ha cambiado en los últimos años, presentando disminución en la extracción de crudos livianos mientras que la de crudos pesados se ha incrementado, manteniéndose constante la extracción de crudos medianos. En términos cuantitativos, los promedios de explotación de crudos en las tres categorías, presenta los siguientes porcentajes en los últimos años: livianos 25%, medianos 35,3%, pesados y extra pesados 39%. La producción de petróleo según el tipo de crudo se puede apreciar en la siguiente gráfica:



Gráfica 3-4. Producción de petróleo según el tipo de crudo. Adaptada de: (Cámara Colombiana de Servicios Petroleros, 2009).

Considerando el peso que tiene el incremento a nivel mundial de la explotación de crudos pesados y extra pesados, y la importancia que representan los hidrocarburos como la principal fuente de energía primaria, es necesario entender la clasificación y composición de estos tipos de crudos y su relación directa con los costos de explotación y transporte; a continuación se presenta un capítulo dedicado a este fin.

### 3.4. Composición y clasificación de crudos

El petróleo, también llamado crudo, es una mezcla homogénea generalmente en estado líquido, compuesta principalmente por hidrocarburos solubles en agua, compuestos orgánicos, oxígeno, metales, sedimentos inorgánicos y agua entre otros elementos.

Los principales constituyentes del crudo son el carbono e hidrógeno (82-86% del peso total), con pequeñas cantidades de Sulfuro (0.1-8% del peso total), Nitrógeno (0.1-1% del peso total) y Oxígeno (0.1-35 del peso total), además de algunos elementos como el Vanadio, Níquel, Hierro que se presentan en partes por millón (SPEIGHT, 2002). Elementos como el Sulfuro son considerados importantes en el proceso de refinación, mientras que otros como nitrógeno y algunos metales tienen efectos perjudiciales en los catalizadores del mismo proceso y deben ser tenidos en cuenta.

La composición y propiedades del petróleo sufren variaciones dependiendo del lugar y la profundidad de extracción. Esto se debe a que la mezcla de hidrocarburos es bastante compleja, ya que muchos hidrocarburos, como las parafinas, naftenos e hidrocarburos aromáticos, pueden estar unidos en una misma molécula. Estas diferencias en los arreglos de hidrocarburos hacen que se creen variaciones en la apariencia física, la composición química y la viscosidad del fluido. Se debe resaltar que la mezcla de hidrocarburos se ve afectada por las características del medio en que se encuentran y la profundidad a la que se encuentra el fluido.

Los cambios en las mezclas de hidrocarburo vuelven más complejo el proceso de refinamiento, ya que este depende del rango de ebullición del crudo, el cual a su vez varía a consecuencia de los cambios nombrados. En este orden de ideas el proceso de refinamiento cambia dependiendo de la composición y propiedades del crudo, pues es necesario recalculer el rango de ebullición y las respectivas temperaturas para las cuales es efectiva la extracción de los diferentes derivados, por medio de la destilación.

Las variaciones en la composición del crudo, permiten su clasificación desde dos puntos diferentes: clasificación por composición química y clasificación según viscosidad y gravedad API°.

### 3.4.1. Clasificación por composición química

Los crudos se pueden clasificar de acuerdo con su composición porcentual de moléculas de Parafina, Naftenos, hidrocarburos Aromáticos, Ceras y moléculas de Asfalteno. Esto se logra mediante un análisis de la composición química obtenida para el residuo derivado del proceso de destilación.

En el proceso de destilación se incrementa gradualmente la temperatura, obteniendo diferentes derivados; sin embargo existe un punto para el cual, sin importar el aumento de la temperatura, no se seguirán obteniendo dichos derivados, por lo cual el proceso de destilación culmina y se obtiene cierto residuo. El residuo obtenido se analiza con el fin de conocer la composición química porcentual de las moléculas ya mencionadas. Para garantizar la culminación del proceso de destilación, las muestras de crudo se analizan después de ser sometidas a temperaturas mayores a los 250°C. En la Tabla 3-2 se muestran las posibles clasificaciones por composición química con base en el proceso mencionado.

Tabla 3-2. Clasificación por composición química. Adaptada de: (SPEIGHT, 2002)

Composición química para residuos obtenidos a 250-300°C					Clasificación del Crudo
Parafinas %	Naftenos %	Aromáticos %	Ceras %	Asfaltenos %	
>46, <61	>22, <32	>12, <25	<10	<6	Parafínico
>42, <45	>38, <39	>16, <20	<6	<6	Parafínico- Nafténico
>15, <26	>61, <76	>8, <13	0	<6	Nafténico
>27, <35	>36, <47	>26, <33	<1	<10	Parafínico – Nafténico - Aromático
<8	>57, <78	>20, <25	<0.5	<20	Aromático

La metodología anterior presenta dificultades para crudos cuyo punto de ebullición se encuentre por encima de 200°C, ya que para este tipo de crudos, a una temperatura de 250-300°C, las moléculas mencionadas no se encuentran aisladas, lo que hace imposible establecer una composición porcentual. Por esta razón la información química debe establecerse con base en un índice de correlación (CI), el cual está dado por la siguiente relación:

$$CI = 473.7 * d - 456.8 + \frac{48,640}{K}$$

Ecuación 3-1. Índice de correlación para clasificación química.

donde  $d$  es la gravedad específica y  $K$  es la temperatura en grados Kelvin del punto de ebullición, determinada mediante el método de destilación estándar (ASTM D-86, ASTM D-1160).

Para valores de CI de 0 a 15, existe predominio de hidrocarburos Alcanos o Parafinas, entonces el crudo se clasifica como Parafínico. Para valores de 15 hasta 50 existe predominio de Naftenos o mezclas entre Naftenos, Parafinas e hidrocarburos Aromáticos, entonces el crudo podría clasificarse como Nafténico o como Parafínico – Nafténico – Aromático. Para valores de CI superiores a 50 el crudo se clasifica como Aromático debido al predominio de este tipo de hidrocarburos.

### 3.4.2. Clasificación según viscosidad y gravedad API°

La gravedad API° es una propiedad física de los crudos, que mide que tanto pesa el crudo con base en el peso del agua; su medida son los grados API. Es una propiedad que tiene cierta similitud con la gravedad específica, no obstante se diferencian en que la gravedad API° es única para cada tipo de crudo, mientras que la gravedad específica dado que relaciona densidades, varía respecto a la temperatura, por lo cual para un tipo de crudo existen diferentes gravedades específicas. La relación que permite obtener la gravedad API° es la siguiente:

$$API^\circ = \frac{141.5}{Gs(15.5^\circ C)} - 131.5$$

Ecuación 3-2. Gravedad API°

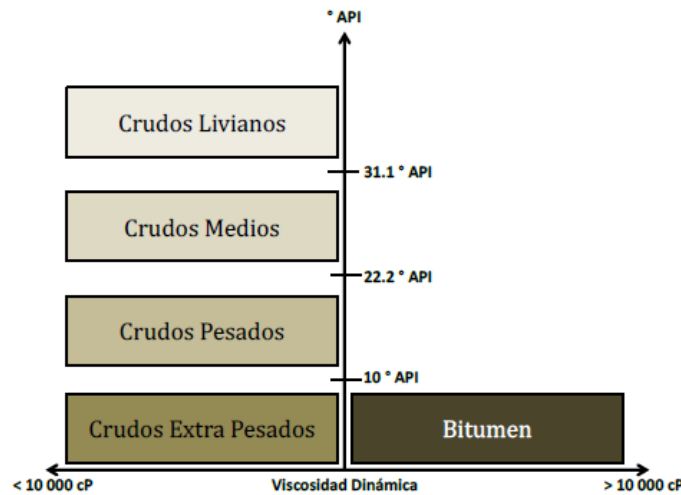
donde  $Gs(15.5^\circ C)$  es la gravedad específica medida a 15.5°C.

Esta propiedad además de ser útil para la clasificación de los crudos, permite la conversión de volúmenes medidos, a volúmenes en una temperatura estándar de 15.5°C, lo que permite establecer la densidad del mismo.

Por otra parte, la viscosidad dinámica es una propiedad que permite medir que tanta resistencia opone cierto fluido a su propio flujo. Esta propiedad se debe al rozamiento de las capas

adyacentes de fluido, al ser sometidas al movimiento. En estado de reposo no existe viscosidad dinámica, ya que no actúan fuerzas sobre las cuales se exista una oposición.

Estas propiedades (Gravedad API° y Viscosidad Dinámica), permiten la clasificación del crudo en 5 tipos diferentes:



**Ilustración 3-2. Clasificación según viscosidad y gravedad API°. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).**

De los tipos de crudo mostrados en la ilustración anterior, tan solo los Crudos Livianos se explotan actualmente a nivel mundial. La explotación y transporte de los otros tipos de crudo implica una mayor inversión, lo que los hace inatractivos.

### 3.5. Viscosidad

Un fluido debe su capacidad de flujo y deformabilidad a las fuerzas de cohesión de las moléculas que lo componen. La viscosidad es una propiedad física de los fluidos que hace referencia a la resistencia que oponen al ser deformados tangencialmente cuando son sometidos a esfuerzos cortantes. Esta propiedad es posible gracias al rozamiento entre las capas adyacentes de fluido; entre mayor sea la viscosidad, más limitado es el movimiento de una capa respecto a la otra, asemejándose a un sólido.

La definición anterior hace referencia a la viscosidad dinámica o absoluta y está dada por la siguiente relación, basada en las ecuaciones de Poisuille y Stokes:

$$\mu = \frac{\pi * P * r^4 * t}{8 * L * V}$$

**Ecuación 3-3. Viscosidad Dinámica.**



donde  $V$  es el volumen de un líquido con viscosidad dinámica  $\mu$  que tarda un tiempo  $t$  en atravesar un tubo capilar de radio  $r$  y longitud  $L$  al ser sometido a una presión  $P$ .

Existe otro tipo de viscosidad denominado viscosidad cinemática, y hace referencia a que tanto se opone un fluido a su deformación tangencial eliminando las fuerzas provocadas por la densidad. Para entender mejor el concepto imagínese dos fluidos con igual viscosidad absoluta fluyendo verticalmente a través de dos tubos capilares iguales, el fluido que tenga mayor densidad va a fluir más rápido debido a que tiene un mayor peso por unidad de volumen, por lo cual va a tener una menor viscosidad cinemática. La medida de este tipo de viscosidad se obtiene de la siguiente manera:

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Ecuación 3-4. Viscosidad Cinemática.

donde  $\rho$  es la densidad de un fluido con viscosidad cinemática  $v$ .

Es importante resaltar que las viscosidades explicadas solo existen en fluidos en movimiento, ya que es en el movimiento cuando son sometidos a fuerzas cortantes que generan deformaciones tangenciales. En el reposo no actúan fuerzas a las cuales los fluidos deban oponerse.

### 3.6. Turbulencia y escalas de medición

La turbulencia es el término que se relaciona con aparente errático movimiento de remolinos del fluido transportado y las pulsaciones aleatorias del flujo (Bohórquez, 2012). Dicho movimiento es generado por microestructuras turbulentas, que secuencialmente y en una combinación de eventos, generan fluctuaciones anisotrópicas de velocidad tanto en el sentido del flujo como perpendicular a este, las cuales impulsan eyecciones de fluido que permiten la disipación de energía, al mismo tiempo que se generan movimientos de fluido en dirección opuesta que suplen el espacio generado por dichas eyecciones.

También puede definirse la turbulencia como el comportamiento caótico del flujo a consecuencia de los cambios aleatorios en las magnitudes de velocidad del fluido comprendido en la región turbulenta.

A consecuencia de que la turbulencia se genera a escalas comparables con el espesor de la sub capa laminar viscosa, es necesario establecer escalas de medición que permitan su estudio. La escala más importante en el estudio de la turbulencia se denomina “unidades de pared” (Wall Units en inglés), y permite establecer la distancia desde la pared sólida (medida en unidades de pared). Esta es una escala adimensional, su definición se presenta en la Ecuación 3-5.

$$y^+ = \frac{y}{\delta_v}$$

Ecuación 3-5. Distancia desde la pared medida en "Unidades de Pared".

donde  $y$  es la distancia real desde la pared de la tubería y  $\delta_v$  hace referencia a la escala de longitud viscosa dada por la siguiente ecuación:

$$\delta_v = \frac{\nu}{v_*} \quad \text{Ecuación 3-6. Escala de longitud viscosa.}$$

En la cual  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido y  $v_*$  es la velocidad de corte. Esta última corresponde a la velocidad de fricción en la pared de la tubería, y está dada por la siguiente relación:

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad \text{Ecuación 3-7. Velocidad de corte.}$$

En esta ecuación  $\tau_0$  es el cortante en la pared de la tubería y  $\rho$  es la densidad del fluido.

La escala de “Unidades de Pared” al ser adimensional, permite analizar la turbulencia para cualquier condición de flujo y de fluido, es decir, para cualquier número de Reynolds y viscosidad cinemática. De igual forma permite un análisis para cualquier sistema de cualquier dimensión y condición.

Entendida la escala de medición para la distancia desde la pared de la tubería, es posible establecer las diferentes zonas de flujo desarrolladas a consecuencia de la interacción flujo – pared, para un régimen de flujo turbulento:

**Tabla 3-3. Zonas de flujo medidas en términos de "Unidades de Pared" para el régimen de flujo turbulento. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).**

Región	Localización	Características
Subcapa laminar viscosa	$y^+ < 5$	El esfuerzo de Reynolds es despreciable en comparación con el esfuerzo viscoso.
Capa Intermedia (buffer)	$5 < y^+ < 30$	Región entre la subcapa laminar viscosa y la zona dominada por la ley logarítmica.
Ley Logarítmica	$y^+ > 30$	Se mantiene la distribución de velocidades logarítmica.
Viscosa	$y^+ < 50$	La contribución viscosa del esfuerzo cortante es significativa.
Capa Externa	$y^+ > 50$	El efecto de la viscosidad en la velocidad es despreciable.

Es importante entender las zonas de flujo y su respectiva localización, con el fin de entender la manera como actúan los Agentes Reductores de Arrastre (tema principal del presente proyecto de grado) cuando sean explicados en el Capítulo 5.

### 3.7.Reducción de arrastre

La reducción de arrastre es el término que hace referencia a la disminución en la disipación de energía, a consecuencia de la atenuación de las estructuras turbulentas, generada por la inyección de materiales naturales o sintéticos al flujo en tuberías presurizadas. Autores como Savins, definen este término como un incremento en la bombeabilidad de un fluido, generado por la adición de material al mismo, o de manera inversa, una disminución en los gradientes de presión para una tasa constante de flujo, generada por la adición de material.

Patterson de forma similar se refiere a la reducción de arrastre como una disminución en el comportamiento viscoso de un fluido en movimiento, lo que significa que para cierta velocidad de flujo, un fluido bajo la adición de sustancias requiere un menor gradiente de presión para su movimiento, que si se tuviese el mismo fluido sin la adición de sustancias.

Es posible cuantificar de manera porcentual la reducción de arrastre en un flujo, al comparar los comportamientos del flujo con adición de sustancias y sin adición de sustancias. Dicha comparación puede realizarse de varias formas, todas son igualmente válidas y se utilizan de acuerdo con la conveniencia del montaje realizado o a las mediciones hechas.

Se puede obtener una medida de reducción de arrastre al comparar los factores de fricción para un escenario sin adición de sustancias (escenario base) y un escenario con adición de sustancias, de la siguiente manera:

$$DR(\%) = \frac{f_{base} - f_{AS}}{f_{base}}$$

**Ecuación 3-8. Reducción de Arrastre bajo la comparación de factores de fricción.**

donde  $DR(\%)$  es la reducción de arrastre porcentual,  $f_{base}$  es el factor de fricción en el escenario base y  $f_{AS}$  es el factor de fricción en un escenario de adición de sustancias.

De igual forma, se puede obtener una medida de reducción de arrastre al comparar las diferencias en las pérdidas de presión a lo largo de un tramo seleccionado, para los escenarios ya descritos, de la siguiente manera:

$$DR(\%) = \frac{\Delta P_{base} - \Delta P_{AS}}{\Delta P_{base}}$$

**Ecuación 3-9. Reducción de Arrastre bajo la comparación de las pérdidas de presión.**

donde  $\Delta P_{base}$  corresponde a las pérdidas de presión para el tramo seleccionado en un escenario base y  $\Delta P_{AS}$  equivale a las pérdidas de presión para el mismo tramo en un escenario de adición de sustancias.

Por último, es posible calcular un porcentaje de reducción de arrastre al comparar los esfuerzos cortantes en la pared de la tubería para ambos escenarios.

$$DR(\%) = 1 - \frac{\tau_{AS}}{\tau_{base}}$$

**Ecuación 3-10. Reducción de Arrastre bajo la comparación de esfuerzos cortantes en la pared de la tubería.**

donde  $\tau_{base}$  es el esfuerzo en la pared de la tubería para el escenario base y  $\tau_{AS}$  es el esfuerzo en la pared de la tubería para el escenario de adición de sustancias.

La precisión con que se calcule la reducción de arrastre, radica en las facilidades técnicas que permitan la medición de las variables necesarias en el método de cálculo seleccionado. Por ejemplo, se debería considerar el cálculo de  $DR(\%)$  mediante la Ecuación 3-9, si se tuviesen elementos técnicos como piezómetros, que garanticen una medida acertada de las presiones en el punto inicial y final del tramo seleccionado para ambos escenarios, para así obtener un resultado confiable.

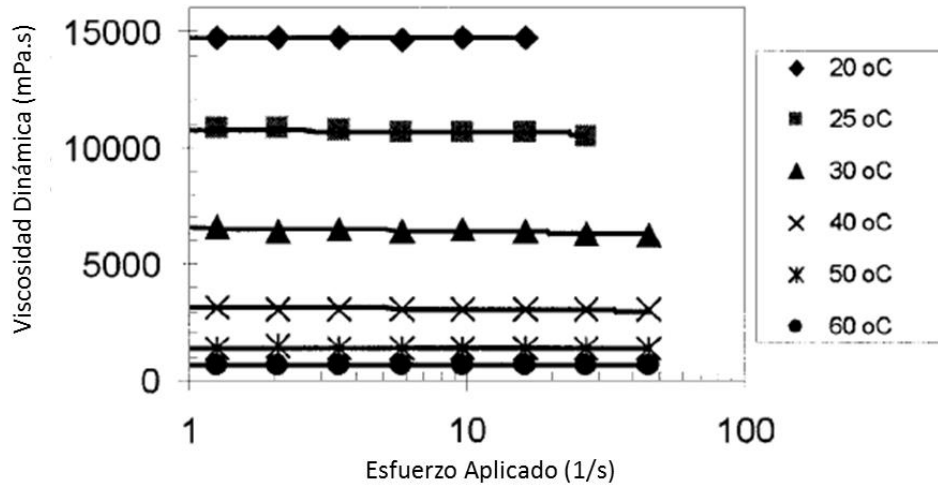
## 4. Métodos de transporte

Dada la característica viscosa de los crudos pesados y extra pesados, su transporte no es tarea fácil, ya que constantemente se ve limitado por la cantidad de energía necesaria para su bombeo a través de oleoductos y el costo de inversión y ejecución que esto implica; incluso hay ocasiones en que es mucho más barato transportar el crudo en carro -tanques a través de la infraestructura vial que hacerlo mediante el bombeo en un sistema de oleoductos. Para responder a esta problemática se han desarrollado metodologías que mediante la alteración del estado natural del crudo facilitan su bombeo y disminuyen los costos del mismo. El objetivo de estos procesos es disminuir o inhibir la característica viscosa del fluido y de esta manera evitar su resistencia al bombeo. Las metodologías tradicionales utilizadas son: Precalentamiento del crudo, Dilución, Refinamiento previo, Emulsión y Flujo anular. Serán explicadas a continuación de forma resumida, haciendo la salvedad de que es un tema complejo que se sale del alcance de este proyecto.

### 4.1. Precalentamiento del Crudo

Las altas viscosidades de los crudos pesados se atribuyen al alto peso molecular de sus componentes, los cuales a bajas temperaturas se enredan entre sí, y a la formación de estructuras ordenadas en la fase líquida (Bemani, Basma, Yaghi, & ali, 2010).

El calentamiento de los crudos pesados permite la destrucción de las estructuras ordenadas en la fase líquida, provocando la agitación de las moléculas y la extensión de las distancias intermoleculares, disminuyendo la fricción entre las capas de fluido y por ende la viscosidad del mismo. En este orden de ideas se afirma que la viscosidad es una propiedad física estrechamente relacionada con la temperatura instantánea del fluido (Gráfica 4-1). Sin embargo la relación entre temperatura y viscosidad es de carácter logarítmico, y depende de cada fluido en especial, por lo cual es necesario determinar dicha relación para cada tipo de crudo. La metodología estándar para el cálculo de la función que relaciona temperatura y viscosidad se explica en la norma ASTM D 341.



Gráfica 4-1. Efecto de la temperatura en la viscosidad de los crudos pesados. Adaptada de: (Bemani, Basma, Yaghi, & ali, 2010).

El método del precalentamiento del crudo consiste en aumentar la temperatura del crudo en las estaciones de bombeo, hasta cierto punto donde la viscosidad es lo suficientemente baja como para garantizar la manejabilidad y transporte del crudo a lo largo del oleoducto. Mediante este método se logra también disminuir la energía necesaria para el bombeo.

Esta metodología, aunque es muy usada a nivel mundial, tiene algunos problemas que se deben resolver antes de su aplicación. Por una parte existe la problemática de que si el crudo se calienta demasiado, puede que cambie su estructura coloidal y sus propiedades reológicas, lo cual afectaría directamente la calidad de los productos derivados (Bohórquez, 2012). Por esta razón se recomienda calentar el crudo hasta una temperatura máxima de 50°C. Sin embargo en ocasiones esta temperatura no es suficiente para permitir el transporte, por lo cual esta metodología debe combinarse con otras como la dilución del crudo, la cual se explicará en el siguiente numeral.

Por otra parte, existen problemas respecto a la infraestructura necesaria, ya que la aplicación de este método implicaría sistemas de calentamiento en las estaciones de bombeo, además la construcción de dichas estaciones lo suficientemente cerca, garantizando que las pérdidas de calor entre tramos no sean suficientes como para comprometer el transporte del crudo. No obstante, debido a las altas temperaturas del crudo, cabe la posibilidad de que la pared interna del oleoducto presente corrosión.

Existen variables que deberían ser tenidas en cuenta, como la afección del clima y la expansión del crudo debida a la temperatura. La primera debe considerarse, pues normalmente los oleoductos se encuentran a la intemperie, por lo cual se ven afectados por un rango de temperaturas considerables que podrían afectar los cálculos de las longitudes de los tramos entre estaciones de



bombeo. De igual forma la expansión del crudo es una variable que afectaría el diseño del oleoducto, en lo que se refiere a los volúmenes de flujo.

La implementación de este método implica la consideración de las problemáticas evaluadas; de lo contrario se podrían obtener cálculos hidráulicos poco confiables, o se podrían considerar potencias mucho menores que las necesitadas para el bombeo del crudo.

## 4.2. Dilución

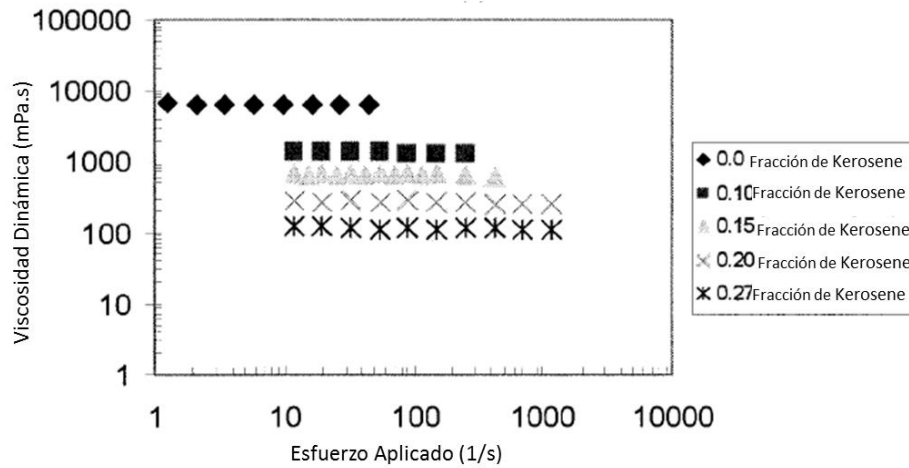
La dilución es uno de los métodos más antiguos utilizados para facilitar el bombeo de crudos pesados. Su origen se remonta a la década de 1930, y su objetivo radica en disminuir la viscosidad de los crudos pesados hasta el punto en que puedan ser bombeados con facilidad a través del oleoducto.

El método consiste en la adición de solventes más livianos y de menor viscosidad (mayor gravedad API) al crudo pesado a transportar, con el fin de obtener una mezcla de una menor viscosidad que la del crudo original. De esta manera se logra que el producto obtenido oponga menos resistencia al flujo, disminuyendo la energía requerida para el bombeo.

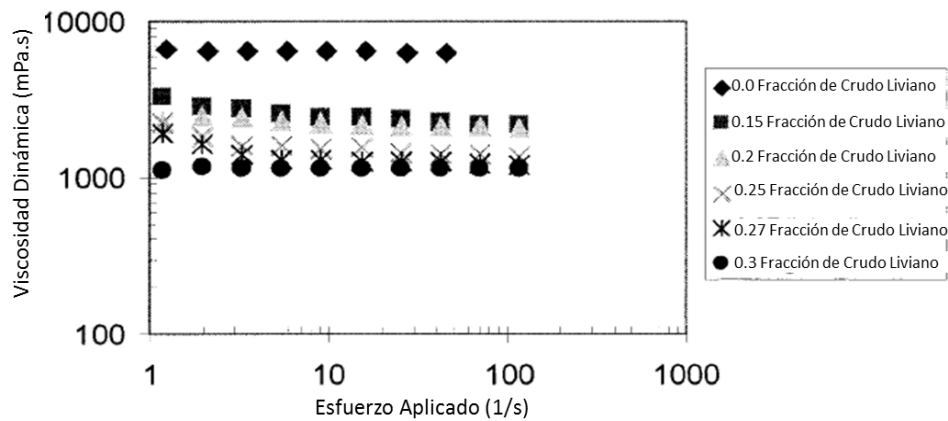
Generalmente para la dilución de crudos pesados se utilizan solventes como Pentanol, Éter, Kerosene, Nafta o crudos livianos. La eficiencia del tipo de solvente utilizado en la disminución relativa de la viscosidad, radica en la polaridad del mismo y las interacciones de los enlaces de hidrógeno con el grupo hidroxilo de las moléculas de Asfalteno presentes en el crudo (Martínez-Palou Rafael, 2010). A mayor polaridad y mayor cantidad de enlaces de hidrógeno, mayor es la eficiencia del solvente utilizado. Esta afirmación destaca el Pentanol y el Éter como los solventes más efectivos; sin embargo el Kerosene es el más utilizado en la industria.

Es necesario predeterminar la relación de mezcla del solvente y el crudo objetivo, ya que en ocasiones se utilizan cantidades de solvente mucho mayores que las necesarias, o el efecto contrario, donde las cantidades de solvente utilizadas no generan las disminuciones en la viscosidad esperadas. Normalmente las cantidades de solvente utilizadas varían entre 20 y 30% del volumen total de la mezcla, obteniendo disminuciones drásticas en la viscosidad dinámica de la mezcla (Gráfica 4-2 y Gráfica 4-3).

Las mezclas entre crudo y solvente deben ser estudiadas atentamente, pues existe la posibilidad de que ambos fluidos sean incompatibles. De darse una incompatibilidad imprevista, se puede incurrir en la floculación de las moléculas de Asfalteno o una cristalización y degradación de las Parafinas presentes en el crudo original.



Gráfica 4-2. Comportamiento de la viscosidad del crudo pesado diluido con Kerosene ( $T=30^{\circ}$ ). Adaptada de: (Bemani, Basma, Yaghi, & ali, 2010).



Gráfica 4-3. Comportamiento de la viscosidad del crudo pesado diluido con Crudo Liviano ( $T=30^{\circ}$ ). Adaptada de: (Bemani, Basma, Yaghi, & ali, 2010).

En las gráficas anteriores se aprecia claramente que las fracciones de solvente utilizadas son bastante altas. Al tenerse grandes volúmenes de solvente en la mezcla, se afecta directamente la viabilidad técnica y económica de este método, pues para transportar cierto volumen de crudo, es necesario adicionar un 30% más de dicho volumen en solvente, lo que implica la necesidad de implementar oleoductos con diámetros mayores, limitando la aplicabilidad en oleoductos existentes.



Con base en las afirmaciones anteriores, si se utilizara este método, se dejaría de transportar un 30% en volumen de crudo en un oleoducto existente o sería necesario incrementar el diámetro de las tuberías de dicho oleoducto con el fin de transportar un mayor volumen de crudo, lo que implicaría un alto costo de inversión.

Por otra parte existe el problema sobre qué hacer con el solvente una vez el crudo haya llegado a su destino. Existen 2 posibilidades; la primera sería vender el crudo junto con el solvente utilizado; sin embargo esta opción implicaría vender la mezcla por un valor menor al que en realidad cuesta, ya que se tendrían que restar los costos del proceso de separación de ambos fluidos, los cuales correrían por cuenta del comprador. La segunda posibilidad sería separar y reutilizar el solvente, lo que significaría un incremento en los costos debido al proceso de separación y la construcción de una tubería que transportara de vuelta el solvente utilizado hasta lugar de origen.

### 4.3. Refinamiento Previo

El refinamiento previo, también conocido como Actualización *IN SITU* es un mecanismo destinado a crudos extra pesados y Bitumen, que busca mediante diferentes procesos, refinar parcialmente este tipo de crudos en el lugar de extracción, aumentando su gravedad API y disminuyendo su viscosidad hasta convertirlos en crudos pesados, para posteriormente mediante mecanismos como la Dilución, Precalentamiento, entre otros, pueda ser transportado a través de un oleoducto.

Existen varias tecnologías que permiten el refinamiento previo; una de ellas es la denominada Conversión *IN SITU* o refinamiento subterráneo. Consiste en la inyección de vapor, hidrógeno caliente y el aumento de la temperatura en el pozo con el fin de convertir los componentes del crudo que tienen un mayor punto de ebullición, en componentes con un bajo punto de ebullición, volviendo el crudo más liviano. Posteriormente se extrae el crudo, y en superficie se separa la parte más pesada y se trata, mientras que la parte liviana es transportada hacia el punto de refinación vía oleoducto.

Otra metodología de refinamiento *IN SITU* es la combustión parcial del crudo una vez extraído del pozo, la cual genera cambios químicos y físicos que disminuyen la viscosidad del crudo.

Por último existe una tecnología relativamente nueva denominada AQUACONVERSION, la cual mediante la a inyección de vapor de agua y catalizadores busca romper los enlaces carbono – carbono, generando moléculas de Parafina y Olefinas más pequeñas, permitiendo una disminución en la viscosidad del crudo.

### 4.4. Flujo Anular

El Flujo Anular es una de las metodologías para el transporte de crudos pesados más atractivas en la industria. A diferencia de los métodos vistos hasta el momento, el Flujo Anular no busca disminuir la viscosidad del crudo hasta el punto en que sea posible su transporte. Este método busca crear un escenario en donde el crudo se encuentre concentrado en un núcleo rodeado por una pequeña película de agua que impida el contacto entre el crudo de alta viscosidad y la pared



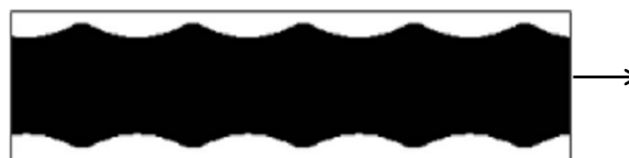
interna de la tubería. Esto con el fin de que la capa de agua actúe como un lubricante sobre el cual se darán todos los efectos de la interacción flujo – pared sólida, es decir, de esta manera se garantiza que los efectos del cortante en la pared de la tubería alteren un fluido menos viscoso (agua), por lo cual se logra disminuir la presión necesaria para el bombeo hasta casi la presión necesaria para bombear agua a través del oleoducto.



Ilustración 4-1. Flujo Anular. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).

Este fenómeno es posible gracias a la naturaleza del agua de migrar hacia las regiones de mayor esfuerzo cortante, en este caso la pared de la tubería (Bai, Chen, & Renardy, 1997). Sin embargo, este método se caracteriza por su alta inestabilidad.

Dado que el Flujo Anular es un flujo de dos fases, y ambas fases se caracterizan por tener diferentes viscosidades, es común que se generen velocidades relativas entre ambas, lo que provoca que el Flujo Anular no sea perfecto. Se pueden generar diferentes fenómenos ondulares (Ilustración 4-2) que le permiten al crudo alcanzar la pared de la tubería y depositarse como pequeños sedimentos adheridos, que no pueden ser removidos por la acción del flujo debido a la alta viscosidad de los mismos (Ilustración 4-3). La acción repetitiva de este fenómeno genera obstrucciones y atascamientos en la tubería que pueden comprometer el transporte del crudo.

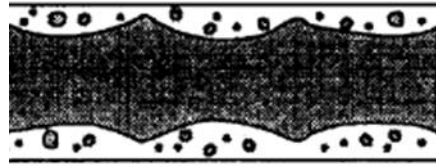


Flujo Anular Bambú



Flujo Anular Sacacorchos

Ilustración 4-2. Flujos Anulares inestables. Adaptada de: (Gosh, Mandal, Das, & Das, 2008).

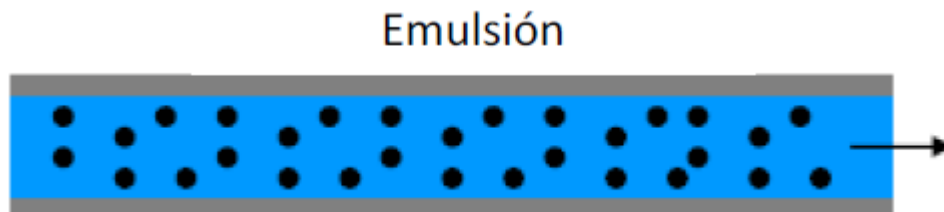


**Ilustración 4-3.** Deposición de crudo en la pared de la tubería por efecto del Flujo Anular Bambú. Adaptada de: (Bai, Chen, & Renardy, 1997).

Por otra parte, la gran desventaja de esta metodología de transporte es que si se llegase a parar el bombeo repentinamente por algún evento extraordinario, cabe la posibilidad de que ocurra una estratificación de fases, lo que permitiría la adhesión del crudo a la pared de la tubería complicando el reinicio del bombeo.

#### 4.5. Emulsión

La emulsión es un método tradicional que busca disminuir la viscosidad del crudo mediante la generación de gotas dispersivas de agua (emulsión agua en crudo), o de crudo (emulsión crudo en agua), estabilizadas con surfactantes (Ilustración 4-4). Siendo el agua un líquido menos viscoso que el crudo, facilita el bombeo a lo largo del oleoducto al mezclarse con el crudo. Dada las diferencias de densidades entre agua y crudo, es necesaria la aplicación de partículas estabilizadoras (surfactantes) que impidan una separación en fases, evitando la disociación del flujo y la posibilidad de que el agua se desplace a diferentes velocidades con respecto al crudo. La estabilidad de la emulsión está ligada a la firmeza de la capa que recubre las gotas.



**Ilustración 4-4.** Emulsión Crudo-Agua. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).

Siendo el agua y el crudo fluidos inmiscibles<sup>4</sup>, las moléculas de estos fluidos se atraen con mayor intensidad en la superficie produciendo una fuerza mecánica que se denomina tensión interfacial<sup>5</sup>, la cual impide la mezcla de ambos. La formación de gotas suspendidas en el fluido se logra mediante la creación de una capa interfacial circundante capaz de sostener el fluido emulsionado (en la ilustración anterior el crudo) y separarlo del fluido dispersivo (en la ilustración anterior el agua). La formación de la capa interfacial se logra mediante la acción de surfactantes naturales

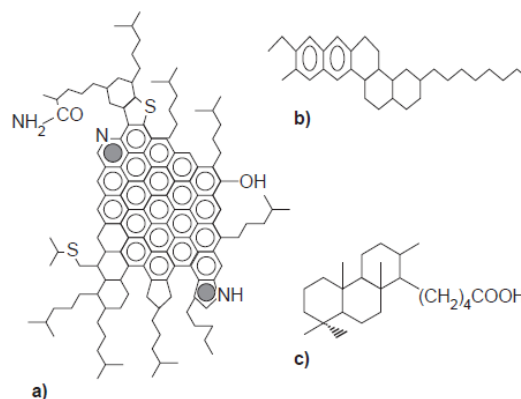
<sup>4</sup> Imposibilidad de mezcla homogénea entre dos o más fluidos, como consecuencia se da la formación de fases o suspensiones.

<sup>5</sup> Fuerza mecánica intermolecular de atracción hacia ejercida sobre las moléculas de la superficie de un líquido.

originarios del crudo, los cuales actúan como emulsionantes naturales que se acumulan en la interfaz (crudo – agua o agua – crudo) de los fluidos, formando las gotas e impidiendo la coalescencia y la separación en fases (Daaou & Bendedouch, 2011).

Existen tres tipos de surfactantes naturales presentes en el crudo, capaces de emulsionar la mezcla; estos surfactantes son conocidos como Asfaltenos, Resinas y Ácidos Grasos. Los Asfaltenos son los mayores emulsionantes naturales; este atributo se debe a su gran peso molecular y sus componentes altamente polares. Por el contrario, las Resinas y Ácidos Grasos no son capaces de emulsionar por si solos, por lo cual deben asociarse con los Asfaltenos para lograrlo; en la mayoría de los casos estas asociaciones son perjudiciales para la mezcla ya que desestabilizan la emulsión. Las Resinas particularmente pueden solubilizar los Asfaltenos en el crudo, y en consecuencia prevenirlos de asociarse para formar la capa interfacial afectando así la estabilidad de la mezcla (Daaou & Bendedouch, 2011). Igualmente, los Ácidos Grasos contribuyen a la desestabilización de la mezcla limitando su rango de PH estable, para el cual PHs fuera de este rango podrían crear suficientes fuerzas repulsivas capaces de romper la capa interfacial.

Los Asfaltenos se definen como moléculas policíclicas en forma de disco compuestas por varias capas de anillos aromáticos<sup>6</sup> con extremos alifáticos<sup>7</sup> y varios grupos funcionales (Ilustración 4-5).

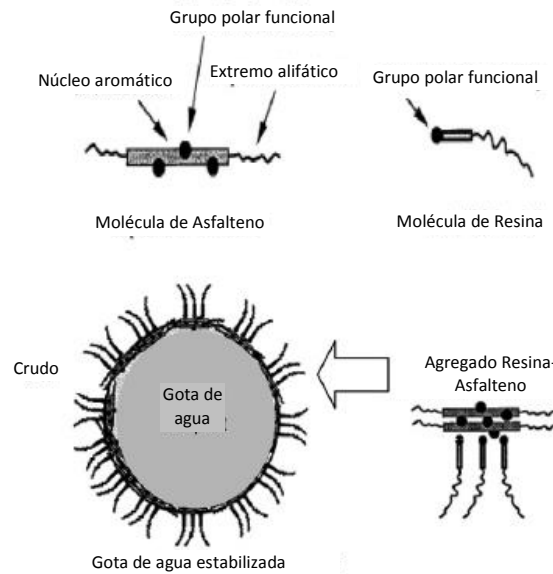


**Ilustración 4-5. Ejemplos de estructuras moleculares. A) asfalteno (adaptado del residuo del crudo Venezuela para una proporción de 510C, INTEVEP SA Tech. Rept, 1992); b) Resina (Athabasta tarsand Bitumen); c) Acido Naptenico. Adaptada de: (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004).**

Las gotas se generan mediante un proceso de absorción, en el cual las moléculas de Asfalteno son atraídas a la gota individualmente, y luego se unen a través de su extremo alifático (Ilustración 4-6). Este proceso de absorción es demorado pero irreversible. En algunas circunstancias los Asfaltenos son absorbidos en forma de agregados, permitiendo el engrosamiento y solidificación de las capas interfaciales (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004).

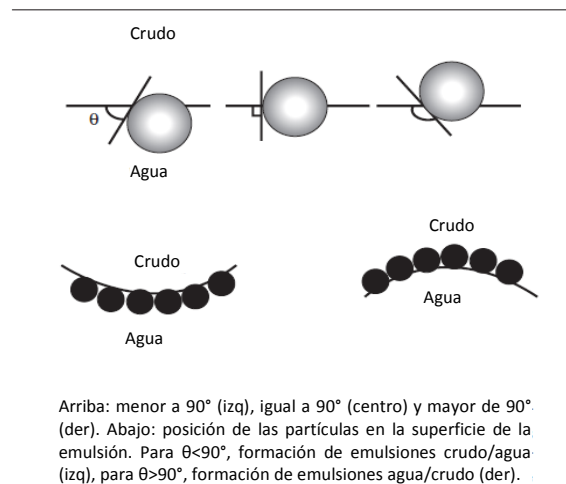
<sup>6</sup> Anillo cíclico de seis átomos de carbono con tres enlaces dobles alternados.

<sup>7</sup> Extremo con cadena abierta de carbonos capaz de originar enlaces simple, doble y triple.



**Ilustración 4-6. Mecanismo de estabilización de emulsiones: capa de asfaltenos formando una interface crudo/agua.**  
 Adaptada de: (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004).

El ángulo de incidencia ( $\theta$ ) de las moléculas en la gota es el parámetro que caracteriza el tipo de emulsión generada (crudo/agua o agua/crudo); este ángulo varía alrededor de  $90^\circ$ , alineación que garantiza la necesidad de una alta cantidad de energía a ser aplicada para el rompimiento de los enlaces intermoleculares; por el contrario, si el ángulo de incidencia se alejase de  $90^\circ$  se tendría un requerimiento bajo de energía y la emulsión no sería estable. Si  $\theta < 90^\circ$  una emulsión crudo/agua es formada; si  $\theta > 90^\circ$  una emulsión agua/crudo es formada.



**Ilustración 4-7. Relación ángulo de incidencia y emulsión formada.** Adaptada de: (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004).

Existen varios factores que influyen directamente en la estabilidad de las emulsiones además del ángulo de incidencia ( $\theta$ ), entre estos factores se encuentra el PH de la mezcla, la adición de surfactantes erróneos y el esfuerzo cortante al que es sometido el fluido durante su bombeo.

El PH y la adición de surfactantes erróneos a la mezcla tienen el mismo efecto. Por una parte, el efecto negativo del PH en la estabilidad de la emulsión es atribuido a la ionización de los grupos polares de la superficie interfacial activa, la cual genera suficientes fuerzas electrostáticamente repulsivas para romper la cohesión de la capa interfacial (Daaou & Bendedouch, 2011). Esto ocurre siempre y cuando el PH de la mezcla este fuera del rango de estabilidad estipulado. Por otra parte, dado que los surfactantes agregados a la mezcla son moléculas con un extremo polar, pueden tener los mismos efectos contraproducentes que el PH; sin embargo, por lo general los surfactantes tienen un efecto positivo en la estabilidad de la emulsión, como se explicará más adelante.

Teniendo en cuenta que la finalidad de la generación de emulsiones es facilitar el bombeo de crudo a lo largo de un oleoducto mediante la disminución de la viscosidad, es conveniente aclarar que por más que se intente disminuir la viscosidad al máximo, el fluido jamás logrará comportarse como un fluido ideal<sup>8</sup>, y en consecuencia siempre existirá el efecto del cortante en flujo.

El efecto negativo del cortante sobre la estabilidad de la mezcla se le atribuye a la capacidad de rompimiento de las capas interfaciales una vez alcanza magnitudes considerables. El esfuerzo al cual son sometidas las gotas está dado por  $\mu G$  donde  $\mu$  es la viscosidad de las gotas en su fase continua, y  $G$  es el gradiente de velocidad. A la vez este esfuerzo es contrarrestado por la presión de Laplace la cual está dada por  $2\gamma/R$ , donde  $R$  es el radio de la gota y  $\gamma$  la tensión superficial. La razón entre estos dos valores es igual a la mitad de la capilaridad de la gota y está dada por:

$$Ca = \frac{\eta * G * R}{\gamma} \quad \text{Ecuación 4-1. Capilaridad.}$$

donde  $Ca$  es la capilaridad y corresponde una medida de cohesión y fuerza intermolecular; si esta medida supera cierta capilaridad crítica ( $Ca > Ca_{cr}$ ), la emulsión se vuelve inestable; por el contrario, si la magnitud permanece bajo este límite ( $Ca < Ca_{cr}$ ), prevalece la estabilidad de la emulsión. La capilaridad crítica  $Ca_{cr}$  depende de la razón de viscosidades:

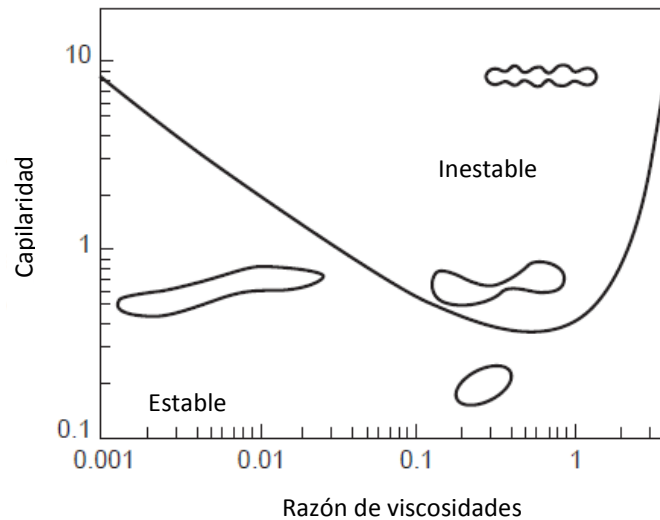
$$\lambda = \frac{\mu_i}{\mu} \quad \text{Ecuación 4-2. Razón de viscosidades.}$$

---

<sup>8</sup> Fluido cuya viscosidad es despreciable y su flujo es constante, irrotacional e incompresible.

donde  $\mu_i$  es la viscosidad de la fase dispersa de las gotas. La relación entre la razón de viscosidades ( $\lambda$ ) y la capilaridad crítica ( $Ca_{cr}$ ) se presenta en la Gráfica 4-4.

La mayoría de las emulsiones son estabilizadas mediante la adición de ciertos surfactantes, ya que de alguna forma, estos surfactantes tienen un efecto positivo al incrementar el rango de estabilidad de la mezcla, es decir, elevan el valor de la capilaridad crítica y por ende proporcionan un mayor rango de estabilidad a la emulsión.



Gráfica 4-4. Capilaridad crítica (línea sólida) para la ruptura de gotas en función de la razón de viscosidades. Adaptada de: (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004).

La desestabilización de la emulsión ocurre como un proceso dividido en tres fases: Floculación, Coalescencia y Sedimentación. La Floculación es un proceso mediante el cual se aglutinan las gotas. Posterior a la aglutinación se da el proceso de Coalescencia, en el cual las gotas, debido a esfuerzos cortantes o de compresión, se fusionan formando gotas de radios mayores. Finalmente, debido al incremento en el radio de las gotas y la fuerza de atracción gravitacional, ocurre la Sedimentación o separación de fases. La velocidad de sedimentación es directamente proporcional al radio de la gota y está dada por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{2 * R^2 * (\rho_i - \rho) * g}{9 * \eta}$$

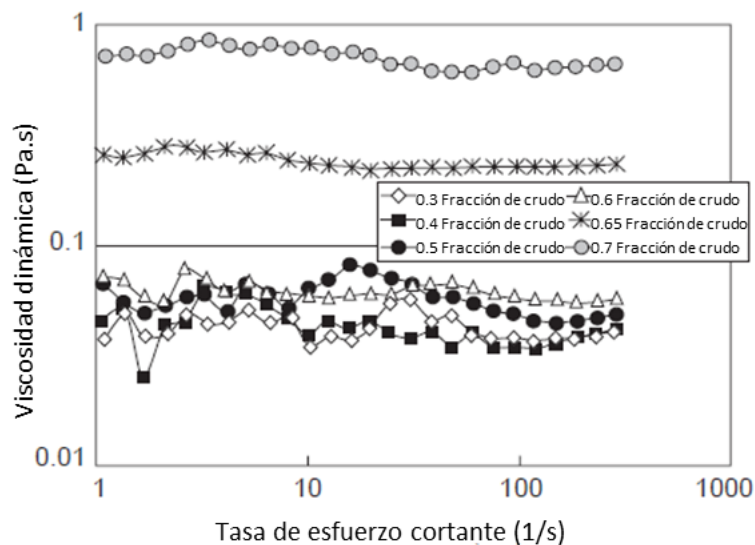
Ecuación 4-3. Velocidad de sedimentación de gotas.

donde R hace referencia al radio de la gota,  $\rho_i$  densidad de la gota,  $\rho$  densidad del fluido y  $\mu$  viscosidad del fluido. Se debe tener en cuenta que el proceso de sedimentación solo ocurre, si:

$$R > 1\mu m$$

La mecánica de estos tres fenómenos se sale del alcance de este proyecto.

La desventaja principal de las emulsiones es la excesiva manipulación de la viscosidad del fluido, tal como se puede apreciar en la Gráfica 4-5: para relaciones crudo – mezcla menores a 0.5 (50% de la mezcla equivalente a la cantidad de crudo presente), el fluido deja de comportarse como un fluido newtoniano<sup>9</sup> por lo cual su viscosidad varía según la tasa de aplicación de cortante, situación común en el desplazamiento del crudo a lo largo del oleoducto; de esta manera sería imposible obtener mediciones exactas de las potencias de las bombas y la energía necesaria para el bombeo de crudo a lo largo del tramo deseado.



Gráfica 4-5. Viscosidad de las emulsiones curdo/agua a diferentes tasas de cortante. Adaptada de: (Langevin, Poteau, Hénaut, & Argilier, 2004).

Dada la necesidad de refinamiento posterior al transporte de crudos, es necesaria la implementación de procesos que permitan la separación de las emulsiones. Procesos como la demulsificación química, el aumento en la temperatura, adición de solventes que modifican el PH y la electrocoalescencia son los más comunes, pero implican un alto costo a la industria.

Además de los métodos tradicionales indagados hasta el momento, existen diversas alternativas que buscan reducir el arrastre con el propósito de disminuir la energía necesaria en el bombeo de crudo, mediante la interacción directa con el fenómeno turbulento originado a lo largo del flujo, fenómeno al cual se le atribuyen las mayores pérdidas de presión. Cabe aclarar que esta es la mayor diferencia respecto a los métodos estudiados hasta el momento, los cuales persiguen el mismo objetivo en el proceso de manipulación de la viscosidad del fluido. A estos métodos se les conoce como Agentes Reductores de Arrastre, constituyéndose en el eje central de este proyecto de grado. A continuación se presenta todo un capítulo dedicado a su explicación.

<sup>9</sup> Fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo.

## 5. Agentes Reductores de Arrastre (DRAs)

### 5.1. Descripción general e historia

Los Agentes Reductores de Arrastre (DRAs por sus siglas en inglés) son todos aquellos materiales que mediante la interacción con el flujo son capaces de modificar la estructura y desarrollo de las diferentes etapas que dan origen al fenómeno turbulento, evitando así las pérdidas de energía en el sistema. Además de reducir las pérdidas de energía, tiene entre sus fines incrementar la capacidad del oleoducto, disminuir la potencia de las bombas necesarias para el bombeo y reducir el diámetro de la tubería, todo esto con el fin de reducir costos en la industria.

El origen de los DRAs se remonta al año 1931, gracias al esfuerzo de Forrest y Grierson quienes fueron los primeros en reportar la reducción en las pérdidas de energía, a partir de la incorporación de pulpa de madera en el flujo turbulento a lo largo de una tubería de transporte de agua. Posteriormente, Mysels investigó el efecto de los surfactantes aniónicos directamente sobre derivados del petróleo, en su caso la gasolina, al adicionarlos y observar cierta reducción de arrastre. Luego, durante su investigación en degradación de polímeros, Toms encontró que la adición de largas cadenas poliméricas (polimetilmetacrilato) al flujo turbulento, permitían la disminución en las superficies de cortante hasta un 80%. Toms reportó este hallazgo ante el Congreso Internacional de Geología, en el cual identificaron este tipo de polímeros como los primeros en permitir reducción de arrastre y dieron por nombre “efecto Toms” a este fenómeno. Posteriormente Savins cambiaría el nombre al fenómeno por “Reducción de Arrastre” y estipularía la ecuación principal que permitiría la medición del mismo:

$$DR = \frac{\Delta P}{\Delta P_s} \quad \text{Ecuación 5-1. Reducción de arrastre.}$$

donde  $\Delta P$  es el gradiente de presiones de la solución y  $\Delta P_s$  es el gradiente de presiones del solvente.

De esta manera la reducción de arrastre porcentual se define como:

$$DR\% = (1 - DR) * 100 \quad \text{Ecuación 5-2. Reducción de arrastre porcentual.}$$

La primera aplicación comercial de los DRAs se da en el oleoducto de Alaska en un tramo de 800 millas desde el norte hasta la ciudad de Valdez en el sur, al cual mediante la aplicación de 1ppm de polímeros de alto peso molecular se logró una reducción de arrastre del 80% (Wang, Yu, Zakin, & Shi, 2011).

Después de esta primera aplicación comercial, los agentes reductores de arrastre se han aplicado exitosamente en oleoductos como el de Irak – Turquía, Bass Strait en Australia, Mumbai Offshore en la India y North Sea Offshore. Actualmente la aplicación de DRAs es indispensable para el



transporte de recursos petroleros vía oleoductos; las industrias petroleras cuentan con un presupuesto especialmente destinado a la compra y manipulación de estas sustancias.

La efectividad en la reducción de arrastre debida a la aplicación de DRAs se asocia directamente con tres factores importantes: el régimen de flujo, el método de inyección y la concentración del agente.

Existen varios tipos de regímenes de flujos que afectarían de manera positiva o negativa la reducción de arrastre. La explicación de la formación de estos regímenes se sale del alcance de este proyecto pero su influencia en la reducción de arrastre se puede observar en Tabla 5-1.

**Tabla 5-1. Efecto del régimen de flujo en la efectividad de reducción de arrastre. Adaptada de: (Jubran, Zurigat, & Goosen, 2005).**

Flow regime	Drag effectiveness	Pipe inclination	Flow conditions	Reference
Full pipe flow (100% oil)	42%	Horizontal pipe	DRA: 10 ppm, superficial liquid: velocity 0.25 m/s	Kang et al. (1998)
Stratified flow	More than 40%	Horizontal pipe	DRA: 10 ppm, superficial liquid: velocity 0.03 m/s, gas velocities 4–7 m/s	Kang et al. (1998)
	67–81%	Horizontal pipe	DRA: 75 ppm, superficial liquid: velocity 0.03 and 0.11 m/s 7 m/s	Kang et al. (1998)
	90%	Vertical pipe	Superficial liquid velocity: 0.5 m/s, superficial gas velocity less than 4 m/s	Kang et al. (1999)
Slug flow	50%	Vertical pipe	Superficial liquid velocity: all velocities; superficial gas velocity more than 4 m/s	Kang et al. (1999)

Respecto a la influencia de la inyección en el desempeño de los DRAs, se afirma que si la localización de la inyección es corriente arriba, la efectividad de la reducción disminuye con el aumento en la velocidad del flujo, mientras que si la localización de la inyección es corriente abajo, la efectividad no se ve alterada (Jubran, Zurigat, & Goosen, 2005).

Para hablar del efecto de la concentración en la efectividad de la reducción de arrastre, es necesario entender la clasificación de los Agentes Reductores de Arrastre, ya que las ventajas y desventajas de la concentración dependen del tipo de agente manipulado. Existen tres tipos de Agentes Reductores de Arrastre: Surfactantes, Fibras y Polímeros; a continuación se presenta una descripción clara, mecanismos de funcionamiento, eficiencia y composición de cada uno de ellos.

## 5.2.Surfactantes

Los surfactantes se definen como nano estructuras anfifílicas<sup>10</sup> con un extremo polar hidrofílico y un extremo no polar hidrofóbico, conocidos también como “polímeros vivos”, sobrenombre que le deben a su capacidad regenerativa tras ser sometidos a altos esfuerzos cortantes.

Este tipo de moléculas se caracteriza por su capacidad de organización en diferentes estructuras y alta capacidad de reducción de arrastre; existen cuatro tipos de surfactantes capaces de atenuar el

<sup>10</sup> Moléculas que poseen un extremo hidrofílico el cual es soluble en agua y un extremo hidrofóbico el cual rechaza el agua.



fenómeno turbulento, estos son los surfactantes Aniónicos, Catiónicos, No Iónicos y Anfóteros, los cuales serán descritos a continuación.

### 5.2.1. Surfactantes Aniónicos

Los surfactantes aniónicos son aquellos cuyo extremo polar hidrofílico está ionizado negativamente. Se caracterizan por ser excelentes reductores de arrastre, debido a su estabilidad mecánica, pero su uso como tal es limitado, ya que son capaces de formar sales insolubles en agua a consecuencia de sus reacciones con iones de calcio y magnesio presentes en este fluido; además, su uso se limita también a su tendencia a formar jabones.

### 5.2.2. Surfactantes Catiónicos

Los surfactantes catiónicos son aquellos cuyo extremo polar hidrofílico está ionizado positivamente. Son los más usados debido a su gran capacidad de reducción de arrastre, su imposibilidad de reacción frente a iones de calcio y magnesio, y el amplio rango de temperaturas en el cual pueden generar reducción de arrastre. Su uso es cuestionado debido a su lenta degradación anaeróbica, cualidad que los hace sospechosos frente a las autoridades medioambientales.

### 5.2.3. Surfactantes No Iónicos

Los surfactantes no iónicos son aquellos cuyo extremo hidrofílico es no polar, es decir, poseen un extremo hidrofílico no ionizado. Se caracterizan por su estabilidad química y rápida biodegradabilidad, pero su uso como agentes reductores es limitado en la industria debido al estrecho rango de temperatura para el cual son efectivos.

### 5.2.4. Surfactantes Anfóteros

Los surfactantes anfóteros son aquellos cuyo extremo hidrofílico polar está ionizado positiva y negativamente. Son los menos estudiados hasta el momento pero se destacan sus propiedades de reducción de arrastre. Sus limitaciones en sus usos como agentes reductores de arrastre se deben a su elevado costo de producción, su escasa alcalinidad en soluciones acuosas y su alta dependencia del PH para permitir reducción de arrastre (posibilidad de DR si  $\text{PH} < 9$ ).

Aunque existen varios tipos de surfactantes, el mecanismo de reducción de arrastre es común para todos; en un medio acuoso, cuando la concentración de surfactantes excede cierto valor crítico, las moléculas se reúnen y organizan perfilando sus extremos polares hidrofílicos hacia el agua, y sus extremos no polares hidrofóbicos hacia un centro común, con el fin de evitar cualquier contacto con el agua, dando así origen a una estructura denominada micela, la cual mediante la interacción con el flujo permite disminuir las pérdidas de energía en el sistema (Wang, Yu, Zakin, & Shi, 2011). La formación de estas estructuras es el eje central de la reducción de arrastre mediante surfactantes, proceso que será explicado a continuación.

### 5.2.5. Formación de Micelas

Los surfactantes forman micelas con el fin de minimizar la superficie de contacto entre el agua y el crudo. La formación de estas estructuras organizadas se debe al incremento en la concentración de los surfactantes. A medida que la concentración aumenta hasta alcanzar una concentración crítica de formación de micelas (CMC por sus siglas en inglés), las moléculas se ven obligadas a formar micelas esféricas o elipsoidales.

Según Yi Wang, al aumentar la concentración un poco más, las micelas se ven obligadas a acercarse unas a otras; esto incrementa la energía en el sistema debido a las fuerzas repulsivas, por lo cual para mantener el sistema estable a un nivel más bajo de energía, las micelas se ven forzadas a reorganizarse en formas no esféricas; este ordenamiento ocurre cuando la concentración de la mezcla se incrementa hasta llegar a un segundo valor crítico de concentración de micelas ( $CMC_2$ ).

Este tipo de concentraciones se mide en relaciones de molaridad<sup>11</sup> y varían dependiendo del tipo de surfactante manipulado, la sustancia utilizada como contraión y la temperatura de la mezcla. Estas variables se explicarán a lo largo del documento.

El efecto de las concentraciones críticas en la formación de diferentes tipos de micelas se debe a dos fenómenos importantes: el parámetro de empaquetado y el número de agregación de las moléculas de surfactante.

Las moléculas al juntarse, debido al incremento en la concentración, experimentan el alineamiento nombrado anteriormente; los extremos hidrofóbicos de las moléculas tienden a unirse entre sí en un punto común minimizando la razón área – volumen de la micela, mientras que los extremos hidrofílicos polares tienden a interactuar bajo fuerzas repulsivas lo que aumenta la razón área- volumen de la molécula (ver Ilustración 5-1). La forma de la micela es originada entonces con base en las fracciones hidrofóbicas e hidrofílicas y está dada por el parámetro de empaquetado, el cual relaciona el área y volumen de la micela mediante la siguiente ecuación:

$$p = \frac{V}{a * l} \quad \text{Ecuación 5-3. Parámetro de empaquetado de micelas.}$$

donde  $V$  es el volumen del grupo hidrofóbico,  $l$  es la longitud de este mismo grupo y  $a$  es el área transversal de grupo hidrofílico. Este parámetro permite clasificar dos tipos de micelas, esféricas y cilíndricas.

Micelas esféricas:

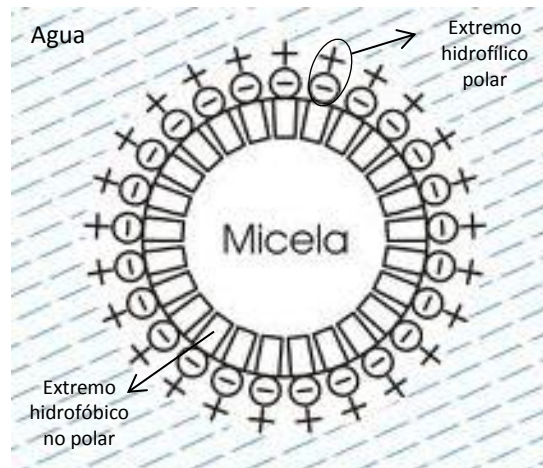
$$p < \frac{1}{3}$$

---

<sup>11</sup> También conocida como concentración molar, es una medida de cantidad de soluto por unidad de volumen.

Micelas cilíndricas:

$$\frac{1}{3} < p < \frac{1}{2}$$



**Ilustración 5-1. Micela compuesta por Surfactantes Anfóteros. Fuente: (Autor).**

El número de agregación de las moléculas de surfactante ( $N_m$ ) es la cantidad de monómeros de surfactante formando una micela, y es un parámetro que contiene información directa de la geometría de la micela.

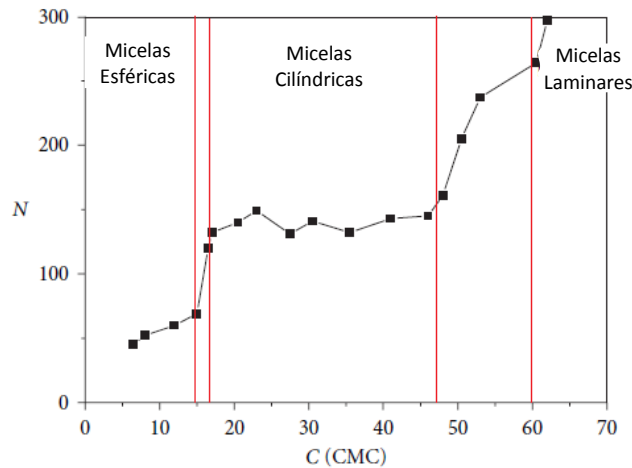
Ying-Bo Zhou sostiene que el incremento en el número de agregación de moléculas de surfactante es proporcional al incremento en las concentraciones de surfactantes. Sin embargo, existen zonas de estabilidad para las cuales el número de agregación permanece constante o sufre pequeñas fluctuaciones insignificantes, aun cuando se da un incremento en la concentración; cada zona de estabilidad es un tipo de geometría de micela, y tiene un número de agregación común.

Estas zonas de estabilidad ocurren tras alcanzar la concentración crítica de las micelas (CMC) y se dividen en rangos estipulados por cantidades de CMCs, lo que se puede apreciar en la Gráfica 5-1, donde se muestran las zonas de estabilidad para la solución del surfactante Dodecilsulfato Sódico (SDS, solución de surfactante más usada en montajes experimentales y sistemas recirculatorios de enfriamiento o calefacción) en un medio acuoso con la adición de NaCl en función de contracción<sup>12</sup> (en razón de masa 1:1). Se encontró que la CMC para esta solución era de 376,4 mM<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Ion que acompaña una especie iónica y mantiene la neutralidad eléctrica.

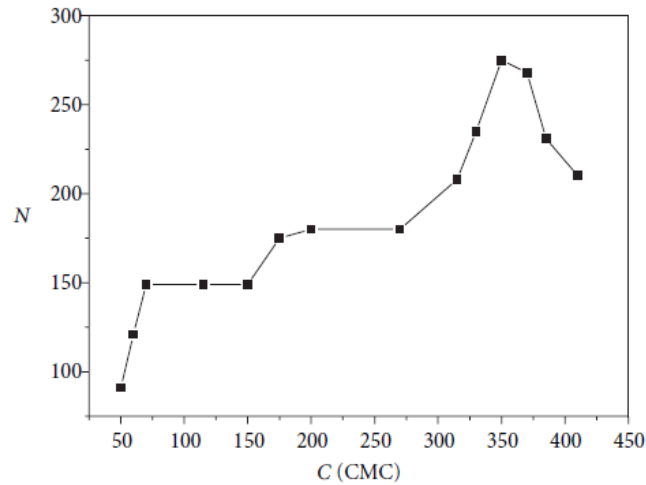
<sup>13</sup> mili Molar: unidad de concentración molar que equivale a  $10^{-3}$  Molar.

Se estipularon tres zonas de estabilidad alusivas a tres tipos de geometrías de micelas. Para un rango menor a 15 CMCs (5.647 mM) se tienen micelas de forma esférica; para valores de concentración superiores 17 CMCs (6.399 mM) pero menores que 47 CMCs (17.690 mM) se tienen micelas con forma cilíndrica; y para concentraciones mayores a 60 CMCs (22.584 mM) se obtienen micelas de forma laminar (Zhou, Xu, Ma, Li, Wei, & Yu, 2011).



Gráfica 5-1. Zonas de estabilidad para la solución de Dodecilsulfato sódico (SDS) con NaCl. Adaptada de: (Zhou, Xu, Ma, Li, Wei, & Yu, 2011).

La función del contraíón es neutralizar la especie iónica, en este caso las moléculas de surfactante, con el fin de mantener una estabilidad eléctrica y de esta manera originar las zonas de estabilidad a pequeñas CMCs; contrario a lo que pasaría si se omitiera el uso de este tipo de iones, en donde las cantidades de CMCs necesarias para alcanzar ciertas zonas de estabilidad se elevarían tal como se puede apreciar en la Gráfica 5-2, donde para la misma solución de surfactante SDS sin la acción del contraíón NaCl, se dieron incrementos en los rangos de estabilidad. Por ejemplo el rango de micelas cilíndricas (MC), el cual paso de  $17CMCs < MC < 47CMCs$  a  $75CMCs < MC < 170CMCs$ .



Gráfica 5-2. Zonas de estabilidad para la solución de Dodecilsulfato sódico (SDS) sin NaCl. Fuente: (Zhou, Xu, Ma, Li, Wei, & Yu, 2011).

La Concentración Crítica de formación de Micelas depende estrictamente del carácter hidrofóbico e hidrofílico de las moléculas de surfactante. El aumento de las cadenas de carbono en el grupo hidrofóbico decrece la CMC, mientras que la localización de la carga iónica en el grupo hidrofílico también repercute positiva o negativamente en la CMC. La explicación de la influencia de estos factores se relaciona con la composición química de las moléculas de surfactante, tema específico que no está dentro de las consideraciones de este proyecto.

Las investigaciones han demostrado que las moléculas de surfactantes son capaces de organizarse en tres tipos de estructuras geométricas, pero solo una de estas es capaz de generar reducción de arrastre en el flujo. Las micelas de forma cilíndrica, debido a su capacidad de enredamiento, (permiten la elaboración de estructuras superiores a manera de redes de micelas), son las únicas capaces de producir disminución de pérdidas de energía en el flujo. Existen dos tipos de micelas cilíndricas: micelas cilíndricas rígidas (*stiff rod-like micelles* en inglés) y micelas cilíndricas flexibles o también denominadas micelas en forma de lombriz (*worm-like micelles*) por su semejanza con este invertebrado. La diferencia entre ambos tipos, radica en la forma y el carácter flexible, esta última se cree es la característica principal que permite la formación de redes de micelas. En otras palabras, las micelas de forma cilíndrica flexibles son las únicas que generan reducción de arrastre.

Las micelas cilíndricas flexibles respecto a las cilíndricas rígidas tienen una forma elongada más pronunciada. La flexibilidad es vital en la formación de redes y se debe a la influencia de tres parámetros: el radio de la sección transversal, la longitud total y la longitud de persistencia.

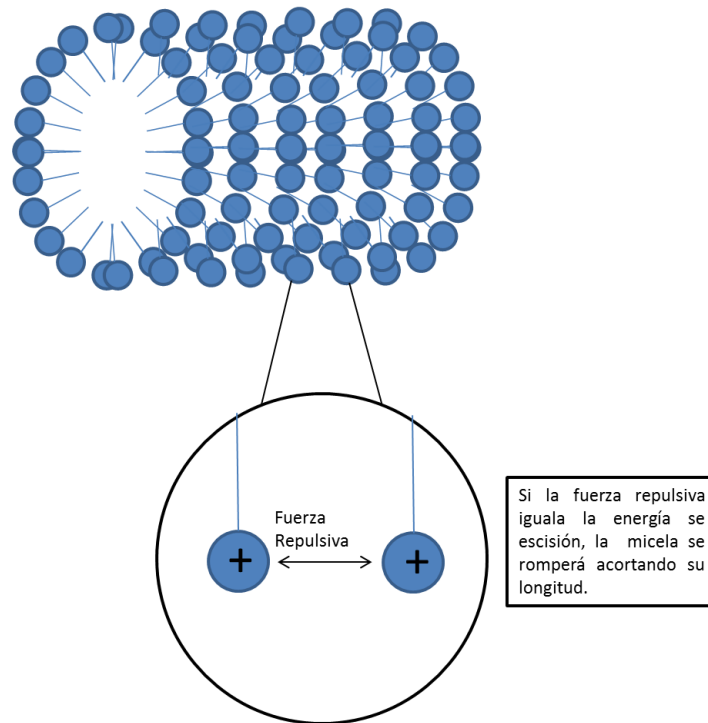
#### 5.2.5.1. Radio de la sección transversal ( $r_{cs}$ )

El radio de la sección transversal es un parámetro que está asociado con la longitud total ( $L$ ) de la cadena de surfactantes y es independiente de la concentración de la solución (Ezrahi, Tuval, &

Aserin, 2006). Su importancia radica en ser un factor determinante de la longitud total de la micela, la cual bajo cierto criterio permite clasificar la micela cilíndrica como flexible.

### 5.2.5.2. Longitud total (L)

La longitud total de la micela ( $L$ ) depende de la información química codificada en la molécula de surfactante y la fracción volumétrica<sup>14</sup> ( $\phi$ ) del mismo. La influencia de la información química codificada se relaciona con el grado y tipo de ionización de los grupos polares hidrofílicos. A su vez, estos grupos polares son los encargados de generar la magnitud de las fuerzas electrostáticas de repulsión, y es a partir de estas fuerzas que se supe la energía de escisión de la micela capaz de provocar la ruptura (Ilustración 5-2). En este orden de ideas, la información codificada determina la longitud de la micela mínima (longitud total) para la cual no existe energía de escisión suficiente para romper la micela.



**Ilustración 5-2. Fuerzas repulsivas en micelas cilíndricas formadas por Surfactantes Catiónicos. Fuente: (Autor).**

Existen dos ecuaciones para el cálculo de la longitud total de la micela:

Para micelas cilíndricas compuestas por moléculas de surfactante no iónico o electrostáticamente neutro, la longitud total obedece a la siguiente ecuación:

$$L = \phi^{\frac{1}{2}} * \exp\left(\frac{E_c}{2 * K_B * T}\right)$$

**Ecuación 5-4. Longitud total de micela no iónica.**

<sup>14</sup> Fracción del volumen total de la solución que corresponde al volumen de surfactante.

donde  $E_c$  es la energía requerida para la división de la micela en dos o más partes (energía de escisión),  $K_B$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura Absoluta (K). Es clara la influencia de la energía de escisión, ya que entre mayor sea su magnitud, la dificultad de rompimiento de la micela cilíndrica también será mayor, por lo cual es posible la estabilidad a mayores longitudes.

Respecto a las micelas cilíndricas compuestas por surfactantes iónicos, donde las fuerzas electrostáticamente repulsivas juegan un papel importante, la ecuación es la siguiente:

$$L = \phi^{\frac{1}{2}} * \exp\left(\frac{E_c - E_e}{2 * K_B * T}\right) \quad \text{Ecuación 5-5. Longitud total de micela iónica.}$$

donde  $E_e$  es la energía proporcionada por las fuerzas repulsivas, la cual favorece el rompimiento de la micela. Esta energía electrostática es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$E_e = K_B * T * l_B * r_{cs} * \gamma^2 * \phi^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 5-6. Energía electrostática de la micela.}$$

donde  $\gamma$  es la carga efectiva por unidad de longitud y  $l_B$  es la longitud de Bjerrum<sup>15</sup>. Se aprecia claramente la influencia directamente proporcional del radio de la sección transversal ( $r_{cs}$ ) mencionado en el numeral anterior.

### 5.2.5.3. Longitud de persistencia ( $l_p$ )

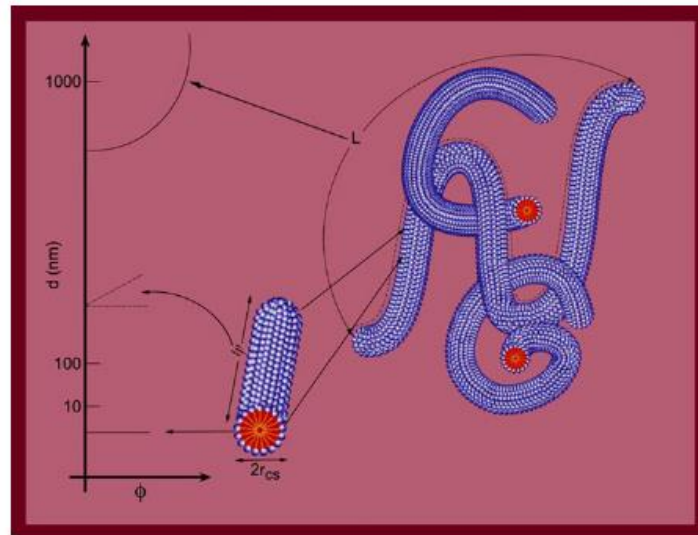
La longitud de persistencia es una medida de la rigidez de la micela, en otras palabras, es la longitud rígida en la micela cilíndrica para la cual no existe grado de curvatura alguno (Ilustración 5-3). Este parámetro está directamente relacionado con el módulo de Doblado  $w$  de la micela (Bending Modulus en inglés), el cual hace referencia al costo de energía de deformaciones curvas en la micela, y es posible calcularlo mediante la siguiente ecuación:

$$l_p = \frac{w}{k_B * T} \quad \text{Ecuación 5-7. Longitud de persistencia.}$$

La importancia de este parámetro reside en que para micelas con longitudes superiores a  $l_p$  el costo de energía elástica para el movimiento curvilíneo es despreciable y la micela entonces es de carácter flexible, en otras palabras, si  $L > l_p$  la micela es considerada cilíndricamente flexible, de lo contrario se considera cilíndricamente rígida.

<sup>15</sup> Longitud de separación a la cual la magnitud de la energía electrostática debida a la interacción entre dos cargas elementales es comparable con la energía térmica ( $K_B * T$ ).





**Ilustración 5-3. Tamaño de los parámetros de flexibilidad micela en función de la fracción volumétrica de surfactante.**  
 Adaptada de: (Ezrahi, Tuval, & Aserin, 2006)

La temperatura, tal como se ha planteado a lo largo del presente proyecto, juega un papel muy importante en el desempeño de los surfactantes; en las ecuaciones anteriores (Longitud Total y Longitud de Persistencia) se aprecia como la temperatura afecta de manera inversamente proporcional los parámetros de clasificación en cuanto se refiere a la flexibilidad de las micelas. A continuación se presenta un numeral destinado a la explicación e influencia de la temperatura en las redes de micelas.

### 5.2.6. Influencia de la temperatura en el comportamiento de la micela

El comportamiento de la micela se ve afectado directamente por los cambios en la temperatura; tal como se aprecia en las ecuaciones de clasificación de flexibilidad, un aumento significativo en la temperatura se ve reflejado en una disminución en la longitud total de la micela, y a su vez, en la longitud de persistencia. Claramente existe una mayor influencia en la longitud total de la micela dada la condición exponencial de la ecuación. No obstante, sostienen Roberta K. Rodrigues, Thiago H. Ito y Edvaldo Sbadini, el eventual decrecimiento en la longitud total de la micela se ve compensado por el flujo convectivo, el cual como consecuencia aumenta el movimiento Browniano<sup>16</sup> en el sistema, alineando las micelas, promoviendo la fusión y el enredamiento de las mismas, efecto que culmina con el aumento de la longitud total de la micela y formación de redes (principal estructura en el fenómeno de reducción de arrastre). De igual forma se aprecia que una disminución en la longitud de persistencia aumenta el rango de clasificación de flexibilidad de una micela. Por lo anterior, se afirma que el aumento de la temperatura en la mezcla aumenta la flexibilidad de las micelas y contribuye a la formación de redes.

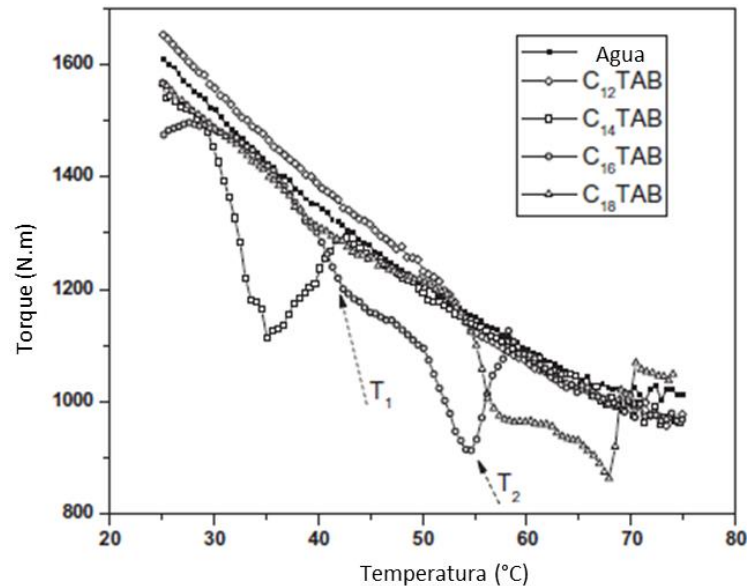
<sup>16</sup> Movimiento aleatorio que se observa en partículas microscópicas suspendidas en un medio acuoso.



Es necesario resaltar que el aumento incontrolado de la temperatura no contribuye infinitamente a la formación de redes de micelas pues como se dijo anteriormente, los surfactantes solo son efectivos dentro de cierto rango de temperatura. K. Rodrigues, Thiago H. Ito y Edvaldo Sbadini plantean la existencia de dos valores críticos de temperatura entre los cuales se genera reducción de arrastre; al primer valor se le denomina temperatura de inicio de reducción de arrastre  $T_1$  (onset temperature for the drag reduction en inglés), valor correspondiente al límite de temperatura para el cual valores superiores a este permiten la formación de redes de micelas y disminución en las pérdidas por fricción, y valores inferiores a este límite impiden la formación de redes de micelas; al segundo valor se le denomina temperatura de rompimiento de micelas  $T_2$  (temperature for break of long micelles en inglés) y es el valor límite de temperatura a partir del cual valores superiores a este ocasionarían el rompimiento de micelas, impidiendo así cualquier fenómeno de reducción de arrastre.

La razón por la cual se da el rompimiento de la estructura micelar a temperaturas superiores al límite  $T_2$ , es el incremento insostenible de la energía en el sistema; en otras palabras, se da un incremento en la energía del sistema debido al efecto de la energía térmica. Este incremento se vuelve insostenible para el sistema, por lo cual las micelas que han conformado una estructura interconectada se ven obligadas a romper estas conexiones y reorganizar sus moléculas, adoptando una forma esférica limitada en tamaño, permitiendo de esta forma el equilibrio en el sistema. Bajo esta nueva configuración es imposible el origen de un fenómeno de reducción de arrastre, pues como se planteó en el Numeral 5.2.5, las micelas cilíndricas son las únicas capaces de originar el fenómeno.

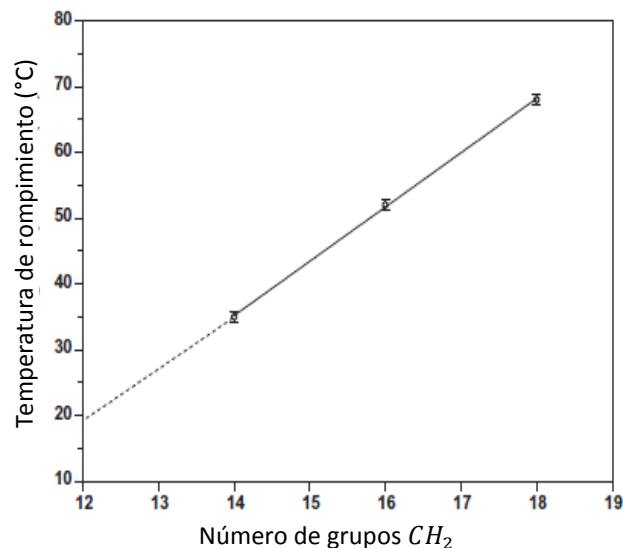
En la Gráfica 5-3 se observa claramente la influencia de la temperatura para diferentes sistemas de soluciones del surfactante Bromuro de Cetiltrimetilamonio (CATB), los cuales son analizados bajo un flujo a velocidad constante, midiendo las variaciones en la fuerza aplicada (torque) necesaria para mantener constante esta velocidad. Este análisis permite correlacionar el esfuerzo cortante, pues fluctuaciones positivas en el torque aplicado indican un aumento en el esfuerzo cortante y viceversa.



Gráfica 5-3. Correlación de diagramas térmicos de flujo y torque aplicado para el mantenimiento de velocidad constante. Adaptada de: (Rodrigues, Ito, & Sabadini, 2011).

En la gráfica anterior se aprecian claramente ciertas fluctuaciones en el torque que se reflejan en una disminución de pérdidas por fricción, denotando así los límites de temperatura  $T_1$  y  $T_2$  que permiten establecer un rango de acción de las micelas. Se observa cómo la fluctuación comienza a una temperatura  $T_1$ , a partir de la cual disminuye el torque necesario (comienza el fenómeno de reducción de arrastre), y culmina inmediatamente después de una temperatura  $T_2$  (fin del fenómeno de reducción de arrastre), tal como se afirmó anteriormente.

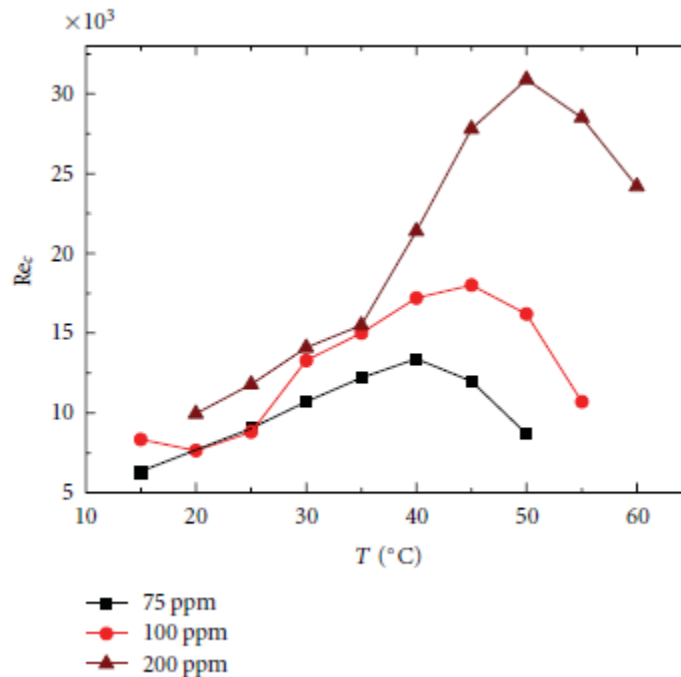
Se observa además, como las fluctuaciones establecen diferentes rangos de temperatura, dependiendo del tipo de surfactante; esto se debe a que las temperaturas críticas están en función de la composición química y concentración del surfactante. En cuanto a la composición química, la temperatura es función de la longitud del grupo alquilo (Gráfica 5-4), a mayor longitud de este grupo mayores serán las temperaturas críticas. Por otra parte, la concentración afecta proporcionalmente la temperatura, a mayor concentración mayores temperaturas críticas y viceversa. La explicación detallada de las dependencias de las temperaturas críticas no está dentro de las aspiraciones del presente proyecto.



Gráfica 5-4. Temperatura de rompimiento de micelas en relación con el grupo alquilo  $CH_2$  para los surfactantes compuestos de Bromuro de alquitrimetilamonio:  $C_{14}TAB$ ,  $C_{16}TAB$ ,  $C_{18}TAB$ . Adaptada de: (Rodrigues, Ito, & Sabadini, 2011).

El efecto de la temperatura, además de estipular un rango de efectividad para la reducción de arrastre, está directamente relacionado con el desempeño de las redes de micelas, ya que un incremento dentro del rango comprendido entre  $T_1$  y  $T_2$ , aumenta la capacidad de soporte de cortante en las redes de micelas, extendiendo el rango de  $Re$  (número de Reynolds) sobre el cual son efectivas. Este efecto se debe al incremento en el movimiento Browniano de las micelas dentro del flujo, el cual aumenta la fuerza de las interconexiones en las redes, volviendo la estructura más fuerte y resistente al cortante.

Se debe aclarar que un incremento en el número de Reynolds significa un incremento en el cortante dentro del flujo. El efecto de la temperatura incrementa el  $Re_c$  (Reynolds crítico) a partir del cual las redes son destruidas, debido a la magnitud del cortante (Gráfica 5-5), extendiendo así el rango de efectividad de las redes. Esto permite afirmar que la máxima reducción de arrastre se obtiene inmediatamente antes de que la solución alcance la temperatura de rompimiento de micelas  $T_2$ , ya que en este momento se da el máximo cortante capaz de ser disipado por las redes de micelas (Rodrigues, Ito, & Sabadini, 2011). La explicación e influencia del efecto del número de Reynolds se efectuará en el Numeral 5.2.9.



Gráfica 5-5. Reynolds crítico vs temperatura de la solución para diferentes concentraciones de Bromuro de alquitrimitilamonio. Adaptada de: (Rodrigues, Ito, & Sabadini, 2011).

A la altura de esta exposición se ha analizado el mecanismo de formación de micelas y los factores que de una u otra forma determinan el mismo; además se ha indagado sobre componentes que influyen sobre el comportamiento micelar. No obstante, es necesario comprender las redes de micelas como la estructura macro final, objetivo de estos elementos, capaz de generar reducción de arrastre; para esto es necesario conocer el mecanismo de formación y acción de las redes de micelas. A continuación se dedica todo un capítulo a la explicación de este fenómeno.

### 5.2.7. Formación de redes de micelas

Bien se sabe que las micelas como elementos individuales no son capaces de generar reducción de arrastre, en consecuencia se ven en la obligación de formar estructuras más elaboradas capaces de originar este fenómeno; a estas estructuras se les denomina redes de micelas y se definen como aglomeraciones tridimensionales multiconectadas de micelas, sostenidas por conexiones capaces de resistir perturbaciones mecánicas. Algunos autores, como Kalus, con base en estudios de los patrones de dispersión de neutrones, sostienen que estas estructuras mantienen un ordenamiento hexagonal, mientras que otros autores como Hoffmann, sostienen que estas estructuras son enredamientos amorfos, cuya composición es muy similar al del gel. Sin embargo la importancia de las redes radica en su efecto sobre el flujo, para el cual su forma no es influyente.

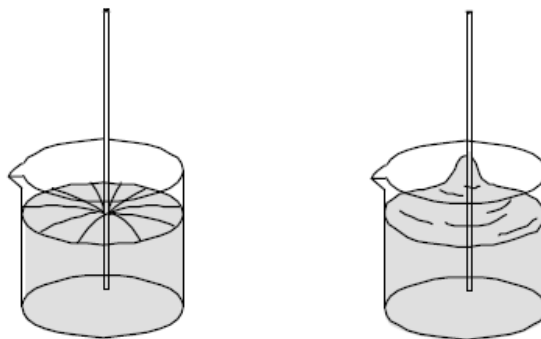
La formación de redes de micelas se debe a dos efectos: el efecto de la concentración, y el efecto del cortante.

Por una parte, la concentración juega un papel muy importante, ya que el incremento en la concentración aumenta la longitud individual y a su vez disminuye la distancia entre micelas obligando al traslape de los elementos. Al traslaparse las micelas se forman puntos de contacto sobre los cuales actúan fuerzas mecánicas y friccionales que contribuyen al enredamiento gradual de estos elementos y la posterior formación tridimensional de redes de micelas.

A pesar de que el incremento en la concentración es un factor influyente en la formación de redes, estas estructuras no se deben en su totalidad a este efecto; por el contrario, se deben al efecto de conjunto de la concentración y el cortante.

Para entender el efecto del cortante se debe analizar la solución (micelas-solvente) como un material viscoelástico; un incremento en el esfuerzo cortante y en la tasa de aplicación del mismo, contribuye a la formación de micelas y el enredamiento de las mismas, aumentando la viscosidad de la solución y cambiando sus características de newtonianas a viscoelásticas.

Durante la Segunda Guerra Mundial se observó que a diferencia de los fluidos newtonianos, los fluidos viscoelásticos al ser sometidos a fuerzas cortantes tienden a desplazarse normalmente al plano de acción de dichas fuerzas (Ilustración 5-4). Esta situación se debe a los fluidos viscoelásticos tienden a desarrollar esfuerzos normales cuando son sometidos a esfuerzos cortantes.



**Fluido newtoniano**

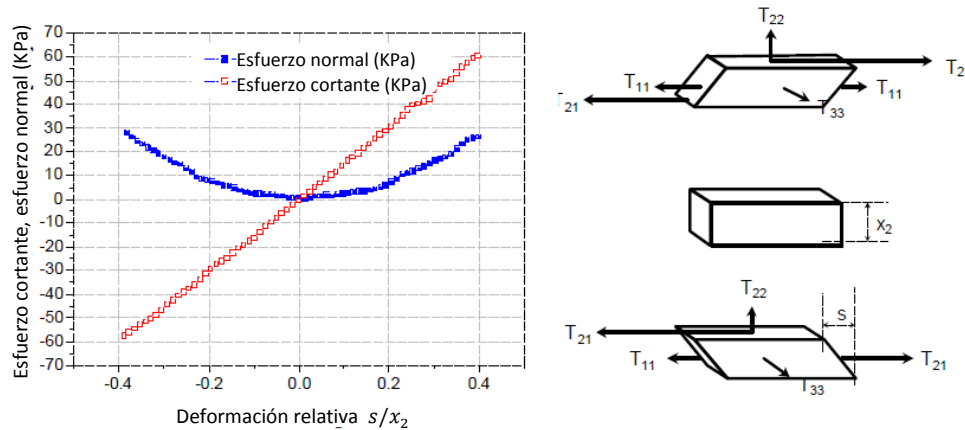
La inercia causa que el fluido se aleje del centro.

**Fluido viscoelástico**

Las fuerzas elásticas causan que el fluido trepe la barra.

**Ilustración 5-4. Efecto de una fuerza cortante generada por a través del torque de una barra sobre un fluido newtoniano y un fluido viscoelástico. Adaptada de: (Franck, 2007).**

El efecto del cortante sobre fluidos viscoelásticos se puede apreciar en la Gráfica 5-6, donde un incremento en el esfuerzo cortante ( $T_{21}$ ) genera una deformación ( $s$ ) y un esfuerzo normal ( $T_{22}$ ).



**Gráfica 5-6. Correlación esfuerzo cortante, deformación (s) y esfuerzo normal para materiales viscoelásticos.**  
 Adaptada de: (Franck, 2007).

Según Yuntao Hu, el incremento en el cortante aplicado y la tasa de aplicación del mismo, tienen dos efectos que contribuyen igualmente en la formación de redes de micelas: el incremento en la diferencia de esfuerzos normales y el incremento en el comportamiento elástico.

La diferencia de esfuerzos normales corresponde a la resta entre los esfuerzos  $T_{11}$  y  $T_{22}$  (Gráfica 5-6) y está directamente relacionada con la parte elástica del módulo complejo de la solución (micelas – solvente) y la deformación debida al esfuerzo cortante. Esta relación está dada por la siguiente ecuación:

$$T_{11} - T_{22} = N_1 = G' * \gamma^2 \quad \text{Ecuación 5-8. Diferencia de esfuerzos normales.}$$

donde  $T_{11}$  y  $T_{22}$  corresponden a los esfuerzos normales mostrados en la Gráfica 5-6,  $N_1$  es la diferencia de esfuerzos normales,  $G'$  es la parte elástica del módulo complejo de la solución y  $\gamma$  es la deformación debida al esfuerzo cortante.

Para entender mejor esta ecuación y su influencia sobre la formación de redes de micelas es necesario aclarar los conceptos viscoelásticos. Los materiales viscoelásticos son materiales difíciles de caracterizar debido a que su comportamiento en sí está gobernado a su vez por otros dos tipos de comportamiento: uno viscoso y otro elástico. El comportamiento viscoso hace referencia al comportamiento líquido del material y se relaciona con un comportamiento disipativo de energía, en el cual el fluido opone resistencia al corte, y disipa la energía debida a este cortante en forma de calor; el comportamiento elástico hace referencia al comportamiento sólido del material, capaz de sufrir deformaciones elásticas, y se relaciona con un comportamiento en el cual la energía debida al cortante es almacenada por el material y posteriormente relajada mediante

un proceso de relajación. La contribución viscosa (comportamiento viscoso) y elástica (comportamiento elástico) establecen el módulo complejo del material<sup>17</sup> ( $G^*$ ).

El módulo complejo está conformado por una parte real (elástica) y una parte imaginaria (viscoso) y está dado por la siguiente ecuación:

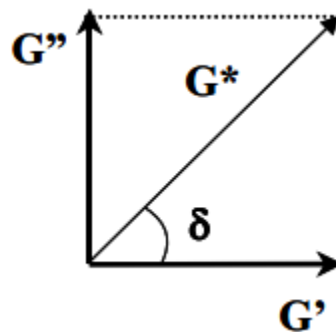
$$G^* = G' + G''$$

**Ecuación 5-9. Módulo complejo de materiales viscoelásticos.**

donde  $G'$  es la parte real debida a la contribución elástica (comportamiento sólido) y  $G''$  es la parte imaginaria debida a la contribución viscosa (comportamiento líquido). Entre mayor sea la contribución elástica, el material actúa más como un sólido con capacidad de almacenamiento de energía y de sufrir deformaciones elásticas, mientras que entre mayor sea la contribución viscosa, el material actúa más como un líquido con capacidad disipativa en forma de calor y sin capacidad de sufrir deformaciones elásticas.

Las contribuciones elásticas y viscosas varían de acuerdo con la frecuencia de aplicación de cortante y temperatura del material; a mayor frecuencia de aplicación de cortante mayor es la contribución elástica y viceversa; a mayor temperatura es mayor la contribución viscosa y viceversa (Ilustración 5-5).

Es importante analizar el comportamiento debido a la temperatura ya que está directamente relacionado con la viscosidad del material; a mayor temperatura menor es la viscosidad pero mayor es la contribución viscosa en el módulo, debido a que su comportamiento se asemeja más al de un líquido, mientras que a menor temperatura mayor es la viscosidad pero mayor es la contribución elástica en el módulo, debido a que su comportamiento se asemeja más al de un sólido.



**Ilustración 5-5. Representación del módulo complejo como combinación de dos vectores, que son el módulo elástico y viscoso. Adaptada de: (Quesada, 2008).**

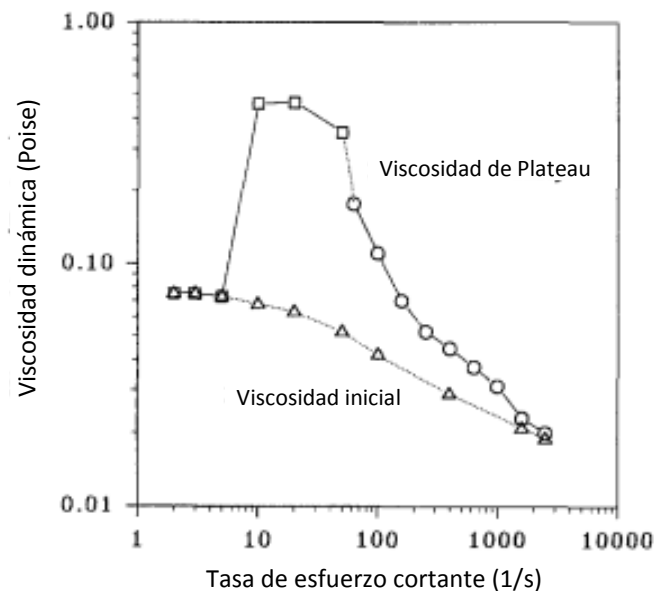
<sup>17</sup> Módulo del vector obtenido como suma de las contribuciones de los módulos elástico ( $G'$ ) y viscoso ( $G''$ ).



El efecto de un incremento en la fuerza y frecuencia de aplicación del cortante en la solución, es un incremento en los esfuerzos normales, lo que se traduce en un incremento en la contribución elástica del módulo complejo y en las deformaciones debidas al cortante.

La formación de las redes de micelas ocurre cuando la diferencia de esfuerzos normales llega a tal magnitud, en donde las micelas por efecto de la deformación longitudinal y el comportamiento elástico, comienzan a enredarse unas con otras dando origen a dichas estructuras e incrementando la viscosidad de la solución.

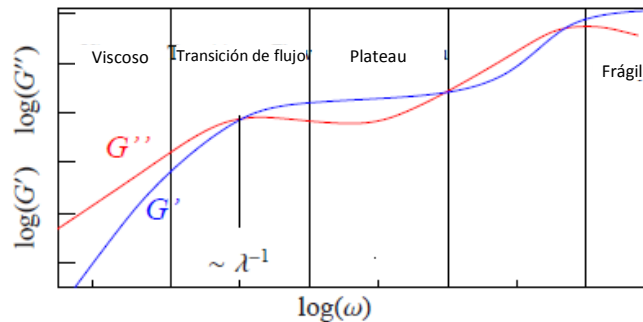
La consecuencia del aumento gradual de la viscosidad contribuye al fenómeno de reducción de arrastre como se verá en el siguiente numeral. Sin embargo, la viscosidad no aumenta infinitamente, su incremento se da hasta alcanzar la viscosidad de Plateau (Gráfica 5-7). La viscosidad de Plateau corresponde a todas las posibles viscosidades de la solución viscoelástica para las cuales el módulo complejo se encuentra dentro de la región de Plateau (Gráfica 5-8). Es en esta región donde la solución alcanza el módulo de Plateau<sup>18</sup>, para el cual la contribución elástica supera la contribución viscosa, por lo cual se afirma que la solución está gobernada por un comportamiento elástico.



Gráfica 5-7. Viscosidad inicial y viscosidad de Plateau para diferentes tasas de aplicación de carga. Adaptada de: (Hu & Mathtys, 1995).

<sup>18</sup> Módulo complejo de materiales viscoelásticos en el cual la contribución elástica supera la contribución viscosa.

Después de la formación de redes de micelas, la diferencia de esfuerzos normales permanece constante, a su vez, el esfuerzo cortante que estaba sujeto a una tendencia incremental, comienza a disminuir notoriamente, por lo cual es posible afirmar la ocurrencia de la reducción de arrastre. La reducción de arrastre es lograda a través de un mecanismo denominado *Deslizamiento de pared* (Wall slip en inglés), el cual será explicado en el siguiente numeral.



Gráfica 5-8. Regímenes de módulo complejo en materiales viscoelásticos. Adaptada de: (Sunthar, 2006).

### 5.2.8. Deslizamiento de pared

Las redes de micelas o fase de gel inducida, caracterizada por tener mayor viscosidad y elasticidad que la solución inicial, se posicionan en dirección del flujo entre el flujo y la pared de la tubería, almacenando el cortante presente mediante la elongación de las mismas, hasta cierto punto donde liberan este cortante mediante un proceso de relajación que involucra el rompimiento de las redes. Posterior a este rompimiento, las micelas quedan libres en el flujo y es el mismo cortante el cual las enreda en redes de micelas nuevamente, listas para interactuar entre la pared y el flujo. Este es un proceso repetitivo que solo culmina con esfuerzos cortantes muy altos para los cuales el proceso de relajación se ve afectado.

Es la característica viscoelástica presente en estas redes de micelas la que permite la reducción de arrastre, por cuanto el módulo de Plateau hace posible la capacidad elongativa de las redes, y de esta manera es posible impedir que el cortante afecte el flujo.

El efecto en sí de las redes de micelas al posicionarse entre la pared y el flujo, es impedir que altas magnitudes de cortante lleguen al flujo, con el fin de evitar la formación y elongación de los vórtices padre, los cuales son la principal causa del flujo turbulento y por ende de las pérdidas por fricción.

#### 5.2.8.1. Relajación de redes de micelas

La reducción en las pérdidas por fricción es posible gracias a la capacidad repetitiva del mecanismo de *Deslizamiento de pared*, ya que sin esta capacidad la efectividad de las redes de micelas sería mínima pues no son capaces de sufrir grandes deformaciones. Esta capacidad repetitiva se debe al proceso de relajación de redes de micelas, proceso mediante el cual las redes elongadas liberan

el esfuerzo cortante almacenado, simultáneo al rompimiento de los enlaces y fragmentación de las micelas que conforman la red, liberando las micelas al flujo para la posterior conformación de nuevas redes bajo el efecto del cortante. Se cree que existen dos mecanismos mediante los cuales es posible relajar el esfuerzo cortante almacenado mediante la deformación de las redes de micelas: *Mecanismo de reptación*, *Mecanismo de escisión reversible*.

Una micela elongada puede relajar el esfuerzo cortante mediante su reordenamiento en una forma no estirada, este reordenamiento es posible bajo la consideración de dos tipos de movimiento: el primero corresponde al movimiento relativo de la micela individualmente con respecto a las otras micelas presentes en la red, mientras que el segundo, corresponde al movimiento de las partículas de las micelas en sí. Ambos movimientos se ven limitados debido a la restricción lateral perpetuada por las otras micelas que la rodean, por lo cual sólo pueden ocurrir mediante el movimiento simultáneo en todas las micelas que conforman la red, o a través de un movimiento que se asemeja al de una serpiente (Ezrahi, Tuval, & Aserin, 2006). Las micelas que rodean la micela elongada forman una especie de tubo curvilíneo sobre el cual es posible el movimiento de la misma (Ilustración 5-6), es a través de este movimiento longitudinal curvilíneo que la micela de manera individual logra atravesar toda la red y se libera de la misma; de manera simultánea se acorta la longitud elongada de la micela y a su vez se dobla hasta el punto en que se encuentran sus extremos. Una vez encontrados sus extremos y ocurrida la liberación, se estiran los extremos doblados en una dirección al azar hasta alcanzar su forma inicial (forma de la micela antes del enredamiento y formación de la red). A este proceso de relajación de esfuerzos se le conoce como *Mecanismo de reptación* y puede ser apreciado en la Ilustración 5-7.

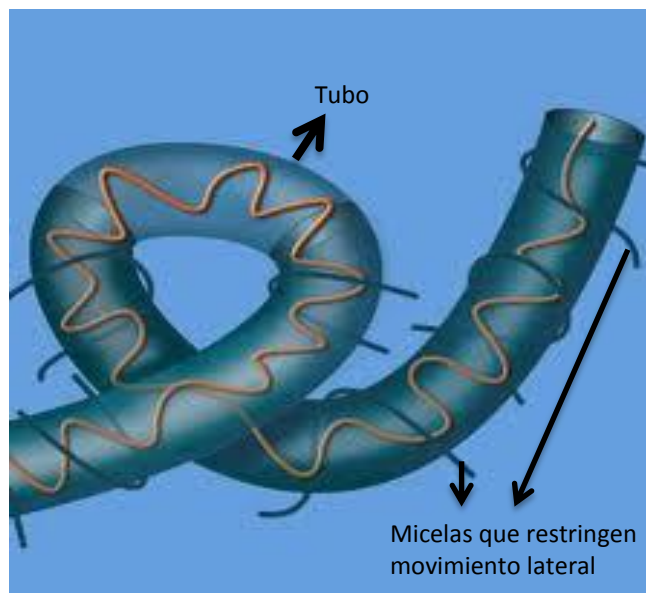
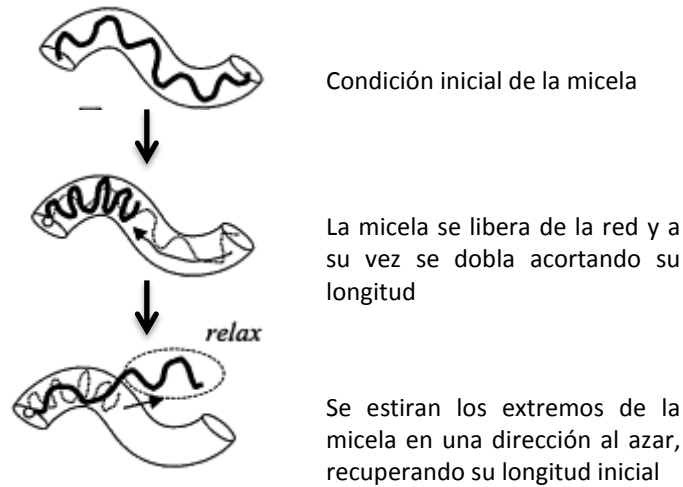


Ilustración 5-6. Tubo formado por micelas circundantes. Fuente: (Autor).



**Ilustración 5-7. Mecanismo de reptación. Fuente: (Autor).**

Por otra parte es posible relajar el esfuerzo cortante a través del rompimiento longitudinal de la micela elongada, formando micelas de longitudes más cortas, capaces de liberarse fácilmente de la red de micelas para luego volver a ser reconectadas, conformando la longitud inicial (forma de la micela antes del enredamiento y formación de la red). Este es un proceso de relajación rápido (relativo a la lenta ocurrencia del *Mecanismo de reptación*) y recibe el nombre de *Mecanismo de escisión reversible*.

Ambos mecanismos están sujetos a un tiempo de ocurrencia denominado tiempo de relajación. Aunque se sabe de la ocurrencia de ambos métodos de relajación, no se conoce con certeza cuál de los dos predomina. Cates propuso un modelo para describir la viscoelásticidad en soluciones de surfactantes, en el cual se utilizaba el mecanismo de reptación modificado de tal forma que incluía a la vez el mecanismo de escisión reversible. El modelo inicialmente calcula el respectivo tiempo de relajación para cada mecanismo:

- El tiempo de reptación ( $t_{rep}$ ) que representa el tiempo de ocurrencia de este mecanismo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t_{rep} = L^3 * \phi^{\frac{3}{2}}$$

**Ecuación 5-10. Tiempo de reptación.**

donde L representa la longitud promedio de micelas y  $\phi$  es la fracción volumétrica del surfactante.

- El tiempo de rompimiento de micelas ( $\tau_b$ ) que hace referencia al tiempo de ocurrencia del mecanismo de escisión reversible, mediante la siguiente ecuación:

$$t_b = \frac{1}{K_1 * L}$$

**Ecuación 5-11. Tiempo de escisión reversible.**

donde  $K_1$  es una constante por unidad de longitud dependiente de la temperatura e independiente del tiempo y la fracción volumétrica de surfactante.

Dos situaciones son propuestas en este modelo:

- $t_b \gg t_{rep}$ , en esta situación la relajación ocurre por el mecanismo de reptación ya que para el instante de tiempo en que debería ocurrir la escisión reversible la micela ya se encuentra relajada, la liberación del cortante ocurre a razón de la siguiente ecuación:

$$\tau(t, \dot{\gamma}) = \tau_0(\dot{\gamma}) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{rep}^{\frac{1}{4}}}\right)$$

**Ecuación 5-12. Relajación del cortante ( $t_b \gg t_{rep}$ ).**

donde  $\tau_0(\dot{\gamma})$  es el cortante en el tiempo cero (cortante en el instante de tiempo que comienza la relajación). Claramente se observa que la relajación del cortante es función del tiempo ( $t$ ) y el grado de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) de la micela elongada dentro de la red, esto se debe a que el cortante almacenado en el tiempo cero es función de la deformación de la micela, y a su vez, disminuye a razón del tiempo.

- $t_{rep} \gg t_b$ , en esta situación el proceso de rompimiento y reconexión de micelas ocurre muchas veces antes de que la micela logre liberarse del tubo formado por otras micelas circundantes (Ezrahi, Tuval, & Aserin, 2006). La relajación del esfuerzo cortante es descrita por la siguiente ecuación:

$$\tau(t, \dot{\gamma}) = \tau_0(\dot{\gamma}) \exp\left(-\frac{t}{t_R}\right)$$

**Ecuación 5-13. Relajación del cortante ( $t_{rep} \gg t_b$ ).**

donde  $t_R$  es el tiempo de relajación que permite la reptación de los segmentos de micelas originados al inicio del proceso de escisión reversible antes de que sean reconectados en la culminación de dicho proceso. Por dicha razón el tiempo  $t_R$  es función de los tiempos  $t_{rep}$  y  $t_b$ , y está dado por la siguiente relación:

$$t_R = (t_b * t_{rep})^{\frac{1}{2}}$$

**Ecuación 5-14. Tiempo de relajación  
combinado.**

Es esta característica repetitiva del fenómeno de Deslizamiento de Pared por la que los surfactantes adquieren el sobrenombre de “polímeros vivos”, y es la capacidad regenerativa tras ser sometidos a esfuerzos cortantes lo que los hace muy atractivos para la industria de calentamiento y refrigeración, la cual implica circuitos cerrados recirculatorios de bombeo de fluidos sobre los cuales los surfactantes; a diferencia de otros agentes reductores como los polímeros (se dañan tras el fenómeno de reducción de arrastre, y al pasar por el sistema de bombeo), son capaces de ser sometidos a varios ciclos sin perder su capacidad reductora de arrastre.

Hasta el momento se han establecido relaciones entre la formación de micelas, formación de redes de micelas, el esfuerzo cortante, la tasa de aplicación del cortante, y el fenómeno de *Deslizamiento de pared*, pero aún no se ha descrito la dependencia de estas relaciones para con el número de Reynolds. En el siguiente Numeral se indaga sobre los efectos del número de Reynolds sobre el desempeño de los surfactantes en el flujo.

### **5.2.9. Influencia del número de Reynolds sobre el desempeño de los surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre**

Se sabe con certeza que el efecto de los surfactantes se debe a la interacción de las redes de micelas con el cortante en la pared de la tubería, y que a su vez, la formación de estas redes depende totalmente del aumento en la diferencia de esfuerzos normales, los cuales se deben al efecto de los esfuerzos cortantes sobre la solución, dada la condición viscoelástica de la misma. A su vez los esfuerzos cortantes se ven influenciados por el número de Reynolds, por lo cual se afirma que el número de Reynolds determina el comportamiento de los surfactantes y la magnitud de reducción de arrastre debida a los mismos.

Para entender la relación entre el número de Reynolds y el esfuerzo cortante en la pared de la tubería, se parte de la relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds expuesta en la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\text{Log} \left( \frac{k_s}{3.7 * d} + \frac{2.51 * \nu}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

**Ecuación 5-15. Colebrook-Withe.**

Esta es una ecuación implícita que describe el factor de fricción en términos de la rugosidad relativa  $\left(\frac{k_s}{d}\right)$  y el número de Reynolds ( $Re$ ), donde la rugosidad relativa es un factor propio de la tubería y el número de Reynolds se relaciona con el tipo de flujo presente en la tubería. Al ser esta una ecuación implícita, es necesario resolverla mediante un método iterativo. El factor de fricción

( $f$ ) permite calcular las pérdidas por fricción en la tubería mediante la ecuación de Darcy Weisbach:

$$h_f = f * \left( \frac{L * v^2}{d * 2 * g} \right)$$

Ecuación 5-16. Darcy Weisbach.

donde  $h_f$  son las pérdidas por fricción,  $L$  es la longitud del tramo evaluado,  $v$  es la velocidad del flujo,  $d$  y  $g$  son el diámetro y la constante gravitacional respectivamente.

De la ecuación de Colebrook-White se afirma que a mayor número de Reynolds menor será el factor de fricción y en consecuencia en la ecuación de Darcy Weisbach menores serán las pérdidas por fricción.

De igual forma es posible establecer una relación entre el cortante en la pared de la tubería y el factor de fricción:

$$f = \frac{8 * \tau_0}{\rho * v^2}$$

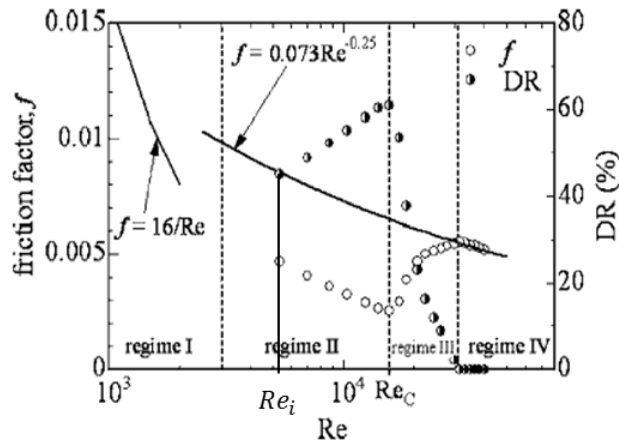
Ecuación 5-17. Factor de fricción.

donde  $\tau_0$  es el esfuerzo cortante en la pared de la tubería y  $\rho$  es la densidad del fluido. Esta ecuación indica que el factor de fricción debe disminuir a medida que la velocidad  $v$  aumenta, es decir, cuando el número de Reynolds ( $Re$ ) se hace mayor, lo cual no implica que el esfuerzo cortante sea menor. Este resultado se debe entender de la siguiente manera: a medida que la velocidad aumenta, las pérdidas de energía por unidad de peso (altura) disminuyen; es decir, es más eficiente mover un fluido, por unidad de peso, con números de Reynolds altos que con números de Reynolds bajos en una tubería dada (Saldarriaga, 1998).

De las ecuaciones anteriores se entiende claramente la relación entre el número de Reynolds, el factor de fricción y el esfuerzo cortante en la tubería. Entendiendo estas relaciones y conociendo que es necesario un esfuerzo cortante inicial que permita la formación de micelas, entonces no cabe duda en la existencia de un número de Reynolds de generación de redes ( $Re_i$ ); de igual forma existe un número de Reynolds que implica un cortante máximo capaz de ser resistido por las redes, a partir del cual estas estructuras se destruyen, atenuando el fenómeno de reducción de arrastre hasta que deja de aparecer; a este número de Reynolds se le conoce como el Reynolds crítico ( $Re_c$ ).

Para observar mejor el efecto del número de Reynolds sobre el fenómeno de reducción de arrastre, se analizarán algunos experimentos expuestos por diferentes autores. F.C. Li en sus estudios analizó el comportamiento del surfactante cloruro de cetiltrimetilamonio concluyendo que el desempeño de los surfactantes se divide en 4 regímenes de flujo (Gráfica 5-9): el Régimen I que corresponde a los estados laminar y transicional, el Régimen II que corresponde al estado turbulento del flujo, y para el cual, el factor de fricción decrece debido al incremento de  $Re$ , y para

el cual se registra un incremento en la reducción de arrastre a medida que aumenta  $Re$ ; el Régimen III que comienza con  $Re_c$  y a partir del cual la reducción en las pérdidas por fricción comienzan a disminuir a medida que aumenta  $Re$ , y que culmina con la atenuación total del fenómeno de reducción de arrastre; y por último, el Régimen IV para el cual no se registra reducción de arrastre.



Gráfica 5-9. Regímenes de flujo de los surfactantes. Adaptada de: (F.-C. Li, 2005).

F.C. Li analizó además el comportamiento del surfactante en cada régimen, al compararlo con el del agua, en cuanto al perfil de velocidades, las fluctuaciones de velocidad en dirección del flujo y las fluctuaciones perpendiculares al flujo. Los resultados se muestran a continuación para los cuales el numeral (a) corresponde al Régimen II, (b) Régimen III y (c) Régimen IV, el Régimen I no se registró dado que los surfactantes no tienen efecto alguno sobre flujos laminar y transicional.

A su vez el mismo autor evaluó el comportamiento en 5 casos diferentes: el cuadro de convenciones se muestra a continuación, donde  $U_b$  y  $u_T$  son la velocidad media del flujo y la velocidad de corte<sup>19</sup> respectivamente:

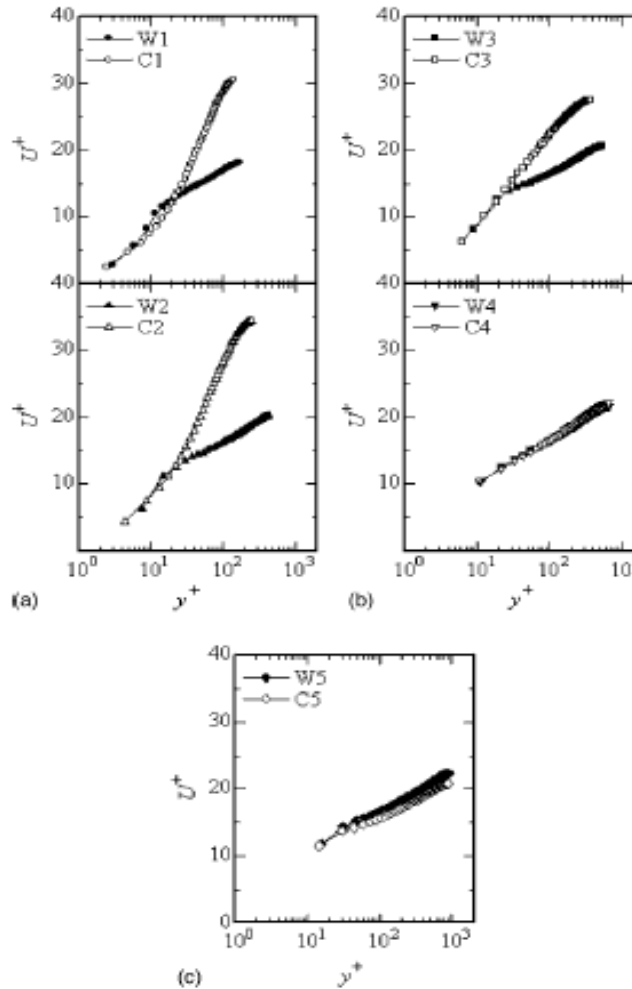
Tabla 5-2. Parámetros de flujo. Adaptada de: (F.-C. Li, 2005).

Cases		Re ( $\times 10^4$ )	$U_b$ (m/s)	$u_T$ (m/s)	DR (%)
Water	W1	0.54	0.110	0.007 15	...
	W2	1.60	0.321	0.018 3	...
	W3	2.01	0.405	0.022 4	...
	W4	2.49	0.501	0.027 0	...
	W5	3.63	0.731	0.037 6	...
CTAC	C1	0.65	0.131	0.005 81	49
	C2	1.43	0.289	0.010 5	60
	C3	1.82	0.366	0.015 3	43
	C4	2.58	0.519	0.026 4	12
	C5	3.32	0.668	0.035 3	0

<sup>19</sup> Esta velocidad (que no existe en la realidad) mide la magnitud relativa del esfuerzo cortante en la superficie sólido-fluido (Saldarriaga, 1998).



Se obtuvo el siguiente perfil de velocidades:

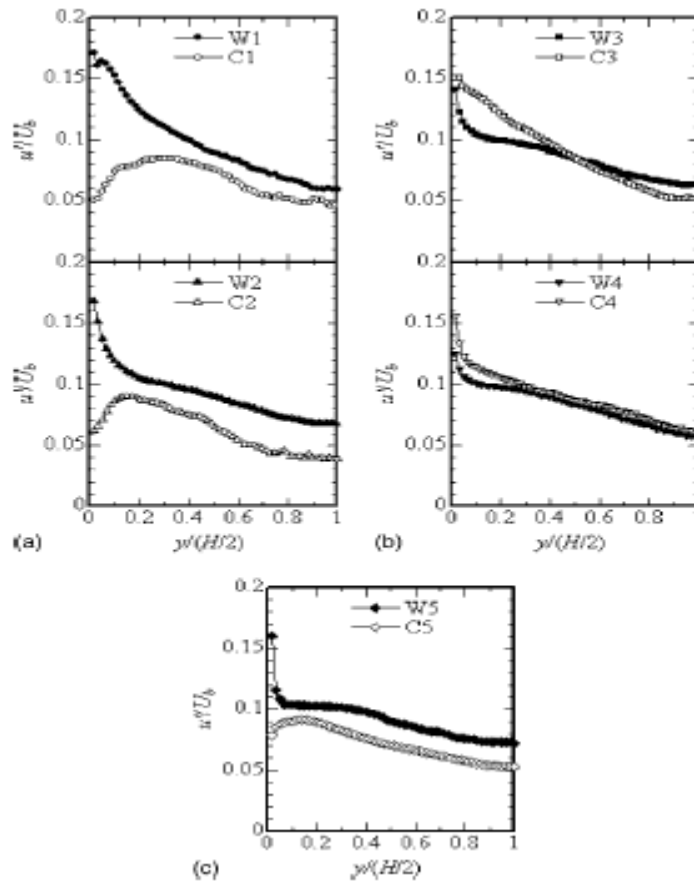


Gráfica 5-10. Comparación del perfil de velocidades de la solución de surfactantes y el agua para los Regímenes de flujo II, III y IV. Adaptada de: (F.-C. Li, 2005).

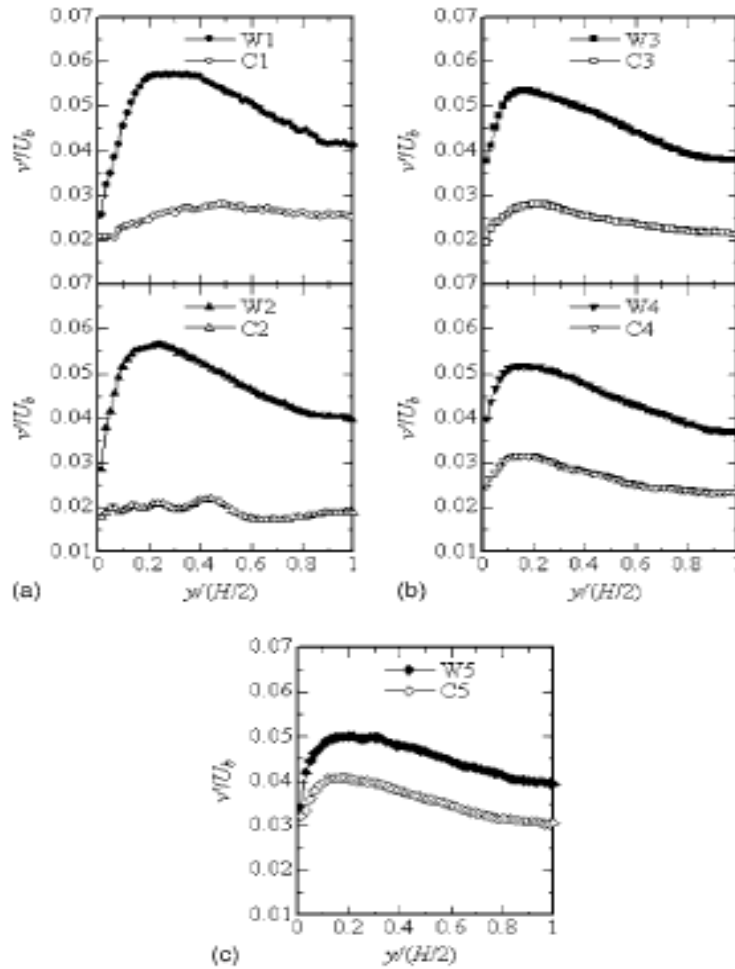
Se observa claramente como para el Régimen II (a), el perfil de velocidades de la solución posee una pendiente más pronunciada que la del agua, lo que denota una laminarización del flujo y el fenómeno de reducción de arrastre, mientras que para el Régimen III (b) el perfil de velocidades de la solución empieza decaer tras alcanzarse  $Re_c$ , pareciéndose cada vez más al del agua, lo que permite inferir que el fenómeno de reducción de arrastre comienza a atenuarse. En el Régimen IV (c) se aprecia claramente como el perfil de velocidades del agua y de la solución convergen, mostrando que no existe fenómeno de reducción de arrastre.

Una situación similar ocurre con las fluctuaciones de velocidades en dirección del flujo y en dirección perpendicular al flujo, donde la comparación de los perfiles en el Régimen II denota una atenuación de las fluctuaciones turbulentas por parte de la solución de surfactante, que

disminuyen el fenómeno turbulento y por ende las pérdidas por fricción; de igual forma, la comparación de los perfiles en el Régimen III denota un aumento en las fluctuaciones turbulentas tras alcanzarse  $Re_c$ , lo que demuestra que el fenómeno turbulento está aumentando, y a su vez, la reducción de arrastre disminuye a razón del aumento de  $Re$ ; finalmente, para el Régimen IV los perfiles tienen una tendencia muy similar, por lo cual se afirma que no existe reducción de arrastre para la solución de surfactante (Gráfica 5-11)(Gráfica 5-12).

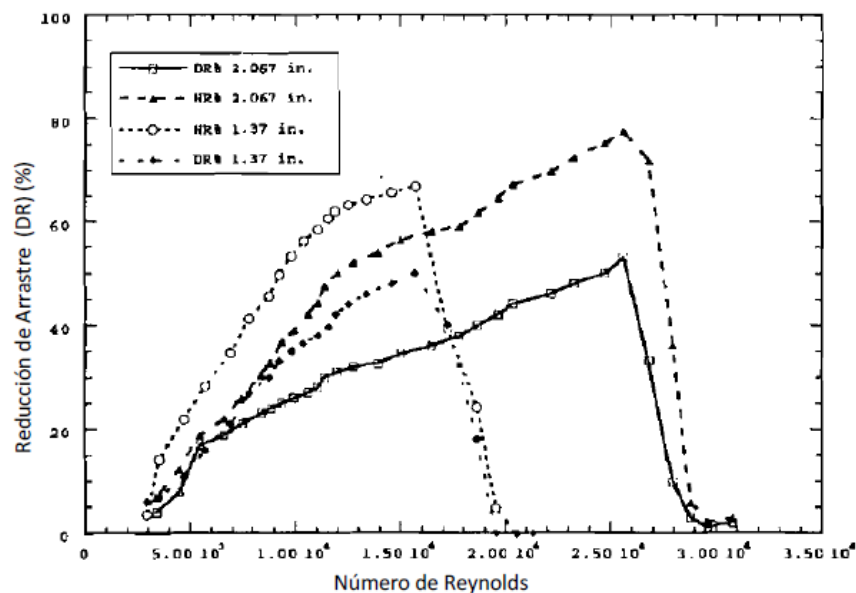


Gráfica 5-11. Comparación de las fluctuaciones de velocidad en dirección del flujo para los flujos de la solución de surfactante y agua. Adaptada de: (F.-C. Li, 2005).



Gráfica 5-12. Comparación de las fluctuaciones de velocidad en dirección normal al flujo para los flujos de la solución de surfactante y agua. Adaptada de: (F.-C. Li, 2005).

Es claro como el número de Reynolds caracteriza el fenómeno de reducción de arrastre, estipulando un rango para el cual las soluciones de surfactantes son efectivas. Sin embargo, estos rangos pueden variar con base a factores como la concentración y temperatura de la solución. Según autores como A. Salem, demuestran que los rangos efectividad, más precisamente para  $Re_c$ , para una misma solución puede variar con el diámetro de la tubería (Gráfica 5-13). La explicación del efecto del diámetro de la tubería sobre el desempeño de la solución de surfactante se sale del alcance de este proyecto.



Gráfica 5-13. Efecto del diámetro de la tubería en el fenómeno de reducción de arrastre. Adaptada de: (SALEM, MANSOUR, & SYLVESTER, 2007).

Al igual que los surfactantes existen otros tipos de agentes reductores que buscan disminuir las pérdidas por fricción en el flujo, sin embargo, aunque el fin es el mismo los mecanismos de acción difieren. El siguiente Numeral se dedica a la explicación del fenómeno de reducción de arrastre en suspensiones de fibras, sus ventajas y desventajas y aplicaciones.

### 5.3. Suspensión de fibras

Los agentes reductores de arrastre de suspensión de fibras se definen como filamentos hechos a partir de diferentes materiales naturales o sintéticos suspendidos en un solvente que generalmente es agua, el cual permite la dispersión de los mismos. Son los agentes reductores menos estudiados hasta el momento; su desempeño y capacidad solo han sido probados en el ámbito teórico con fines destinados a la industria papelera. No obstante, sus características los hacen atractivos para el bombeo de crudo en la industria petrolera.

Las fibras pueden ser fabricadas a partir de gran variedad de materiales; entre las más comunes se encuentran las de nylon, asbesto, pulpa de madera y tela. Difieren principalmente en longitud y diámetro, son inyectadas al sistema en forma de solución y su efectividad depende del grado de concentración que se emplee y las características unitarias de las fibras.

La efectividad de las suspensiones de fibras como agentes reductores de arrastre radica en la capacidad de formar flóculos<sup>20</sup>, pues son estas estructuras en sí a las que se les atribuye el

<sup>20</sup> Aglomeraciones temporales de fibras formadas en el flujo debido al movimiento e interacción de las mismas.

fenómeno de reducción de arrastre. Sin embargo, la floculación en las suspensiones está ligada a diversos factores externos, como por ejemplo, la concentración de la suspensión, relación de aspecto<sup>21</sup>, orientación y dispersión de las fibras en el flujo, y características individuales como la rigidez y superficie. Son esta cantidad de variables lo que dificulta la predicción del comportamiento de las suspensiones de fibras y por lo mismo son los agentes reductores menos estudiados.

La concentración es sin duda uno de los factores más influyentes en la floculación de fibras; se define como el porcentaje de consistencia de masa obtenido a partir de la razón de masa total de fibras sobre masa total de la suspensión (Ecuación 5-18). Su importancia se debe a que es el parámetro que define la proximidad entre fibras dentro de la suspensión y la posibilidad de colisionar unas con otras. El colisionamiento genera conexiones mecánicas entre fibras que obligan a enredarse unas con otras formando flóculos.

$$C_m = \frac{\text{Masa de fibras}}{\text{Masa total de suspensión}} = \text{wt\%} \quad \text{Ecuación 5-18. Concentración de suspensión de fibras.}$$

Inicialmente, a concentraciones bajas, las fibras se encuentran libres en la suspensión, es posible la rotación y el desplazamiento, las posibilidades de encontrarse una fibra con otra son mínimas y no existen colisiones entre fibras. Sin embargo, a medida que la concentración aumenta, el espacio comprendido entre fibras disminuye y las colisiones son cada vez más comunes, creando puntos de contacto que permiten la floculación. No obstante, para concentraciones muy altas, puede presentarse la restricción total en movimiento de las fibras, y la formación de redes (flóculos de gran tamaño) que contribuyen negativamente al fenómeno de reducción de arrastre (oponen resistencia al flujo) y en ocasiones generan atascamiento en la tubería. Existe una concentración crítica ( $C_c$ ) dada en términos volumétricos a partir de la cual las fibras empiezan a colisionar unas con otras:

$$C_c = 1.5 * \left(\frac{d}{L}\right)^2 \quad \text{Ecuación 5-19. Concentración crítica de colisión de fibras.}$$

donde  $d$  y  $L$  son el diámetro y longitud de una fibra promedio respectivamente. Con base en el concepto de las colisiones entre fibras y la concentración crítica, Kerekes define la propensión de las suspensiones de fibras a la floculación, y la cantidad de contactos mecánicos por fibra en términos de un número adimensional conocido como el Número de Aglomeración (Crowding Number en inglés), este término hace referencia al número de fibras presentes en un volumen esférico de diámetro igual a la longitud de una fibra promedio en la suspensión (Ilustración 5-8) y está dado por la siguiente ecuación:

---

<sup>21</sup> Razón entre la longitud y el diámetro de la fibra promedio.

$$Nc = \frac{2}{3} * C_v * \left(\frac{L}{d}\right)^2$$

Ecuación 5-20. Número de aglomeración de fibras basado en la concentración volumétrica.

Como se puede apreciar,  $Nc$  está en términos de la concentración volumétrica ( $C_v$ ) y las dimensiones de la fibra. Si la concentración de la suspensión corresponde a la concentración crítica, el número de aglomeración es igual a 1, este valor marca el límite para el cual suspensiones con números de aglomeración mayores o iguales a este, sufren colisiones entre fibras y tienden a formar flóculos, de igual forma, números de aglomeración menores a este significa que las fibras se encuentran libres y no existen colisiones en la suspensión.

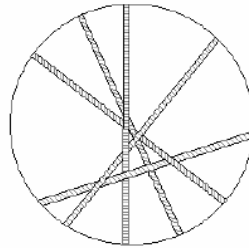


Ilustración 5-8. Representación gráfica del número de aglomeración. Adaptada de: (BEGHELLO, 1998).

Para el análisis de suspensiones de fibras es conveniente expresar el número de aglomeración en términos de la concentración de consistencia de masa, debido a que el concepto de concentración volumétrica se puede ver alterado por factores externos como el coeficiente de expansión (tanto para las fibras como el solvente) y la temperatura. Kerekes propone la siguiente ecuación para  $Nc$  basada en la concentración de consistencia de masa:

$$Nc = 5 * Cm * \frac{L^2}{\omega}$$

Ecuación 5-21. Número de aglomeración de fibras basado en la concentración de consistencia de masa.

donde  $\omega$  es el peso por unidad de longitud del tipo de fibra utilizado expresado en  $kN * m$ . Habiendo comprendido el significado del número de aglomeración, es posible entonces clasificar las suspensiones de fibras en tres tipos diferentes:

- Suspensión de fibras tipo I: suspensión en la cual no existen restricciones en el desplazamiento de las fibras; cada fibra individualmente es libre de rotar sin la posibilidad de encontrarse con otras, no existen colisiones entre fibras. Este tipo de suspensiones ocurre para  $Nc < 1$ .

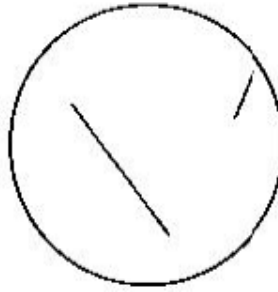


Ilustración 5-9. Suspensión de fibras tipo I. Adaptada de: (Delfos René, 2011).

- Suspensión de fibras tipo II: suspensión en la cual el movimiento de las fibras es limitado; es posible la rotación individual de cada fibra con la posibilidad de colisionar con otras; las fibras están en permanente contacto unas con otras, aproximadamente dos puntos de contacto por fibra. A consecuencia de estas características las fibras tienden a formar flóculos en la suspensión. Este tipo de suspensiones ocurre para  $1 \leq Nc < 60$ .

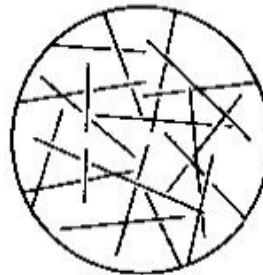
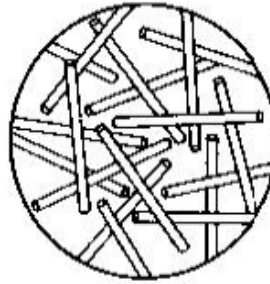


Ilustración 5-10. Suspensión de fibras tipo II. Adaptada de: (Delfos René, 2011).

- Suspensión de fibras tipo III: suspensión en la cual las fibras se encuentran totalmente rígidas y bloqueadas debido a la formación de redes, las cuales restringen el movimiento y la rotación de las mismas. Este tipo de redes, aunque también son flóculos, se diferencian de los flóculos formados en la suspensión de fibras tipo II, en el tamaño y en la libertad de movimiento de las fibras (tipo II: capacidad de movimiento unitario de las fibras; tipo III: fibras totalmente restringidas en movimiento), más de tres contactos por fibra. Este tipo de suspensiones ocurre para  $Nc \geq 60$ .



**Ilustración 5-11. Suspensión de fibras tipo III. Adaptada de: (Delfos René, 2011).**

El fenómeno de reducción de arrastre ocurre únicamente para flóculos formados en la suspensión de fibras tipo II, debido a que la libertad de movimiento de las fibras impide que los flóculos opongan resistencia al flujo, además incide el tamaño, menor al de los flóculos formados en las suspensiones tipo III, permitiendo que se desplacen con el flujo. En contraposición, los flóculos formados en las suspensiones de fibras tipo III, debido a su gran tamaño tienden a separarse del flujo, ubicándose en las paredes de la tubería, oponiendo resistencia al flujo, y en la mayoría de los casos, convirtiendo el flujo a velocidad constante asemejándolo al movimiento de un pistón.

El grado de floculación y el tamaño de los flóculos, además de la concentración se ven afectados por las dimensiones de las fibras presentes en la suspensión, específicamente por la relación de aspecto, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$r = \frac{L}{d}$$

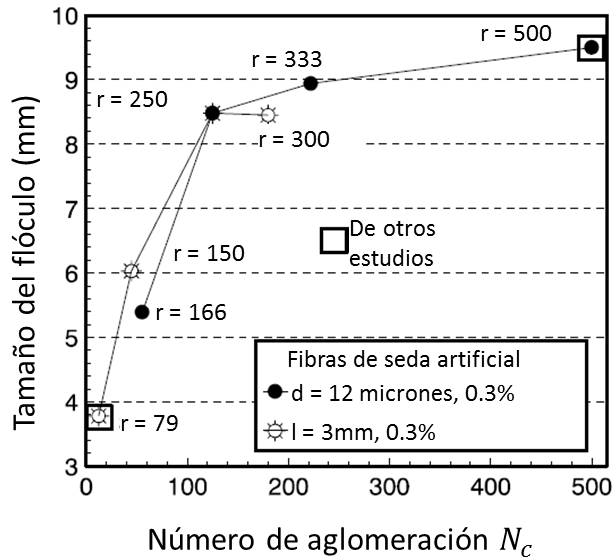
**Ecuación 5-22. Relación de aspecto de fibras.**

El efecto de la relación de aspecto expresa que entre mayor sea su magnitud, la formación y el aumento en el tamaño de los flóculos es más sensible al aumento en la concentración y en el número de aglomeración, tal como se puede apreciar en la Gráfica 5-14. Sin embargo, para relaciones de aspecto menores o iguales a 25, la floculación es inestable, la concentración no tiene influencia alguna sobre el tamaño de los flóculos (Gráfica 5-15), lo que hace difícil la predicción de los efectos sobre el flujo turbulento. Por el contrario, para valores de relación de aspecto superiores a 25, el proceso de floculación es estable, es posible establecer una relación entre la concentración y el tamaño de los flóculos, y una tendencia en cuanto a efectividad en la disminución de las pérdidas por fricción.

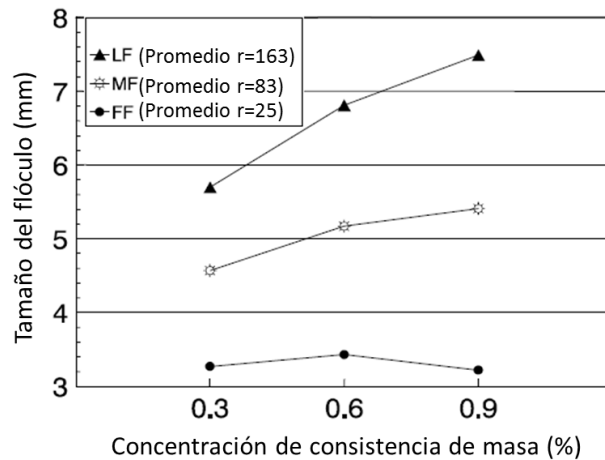
La relación de aspecto, dado que involucra el diámetro de las fibras, sugiere que solo es posible obtenerla para fibras con sección transversal circular; sin embargo, establecida la condición de que las fibras generalmente tienen una sección transversal geoméricamente distinta o que no es perfectamente circular, es necesario encontrar una relación que permita obtener un diámetro



teórico que supla esta variable. Esto se logra a través de una técnica de análisis en la cual se circunscribe la sección transversal de la fibra dentro de una elipse de radio mayor  $a$  y radio menor  $b$ , posteriormente, se calcula el área de la sección transversal de dicha elipse ( $A = \pi * a * b$ ) y se relaciona con una sección circular de igual área transversal ( $A = \pi * d^2 / 4$ ). De esta manera se obtiene una relación para el diámetro de fibras con sección transversal no circular  $d = 2 * \sqrt{a * b}$ .



Gráfica 5-14. Efecto del número de aglomeración para suspensiones con diferentes valores de relación de aspecto. Adaptada de: (BEGHELLO, 1998),



Gráfica 5-15. Efecto de la concentración de consistencia de masa en fibras con diferente relación de aspecto. Adaptada de: (BEGHELLO, 1998).

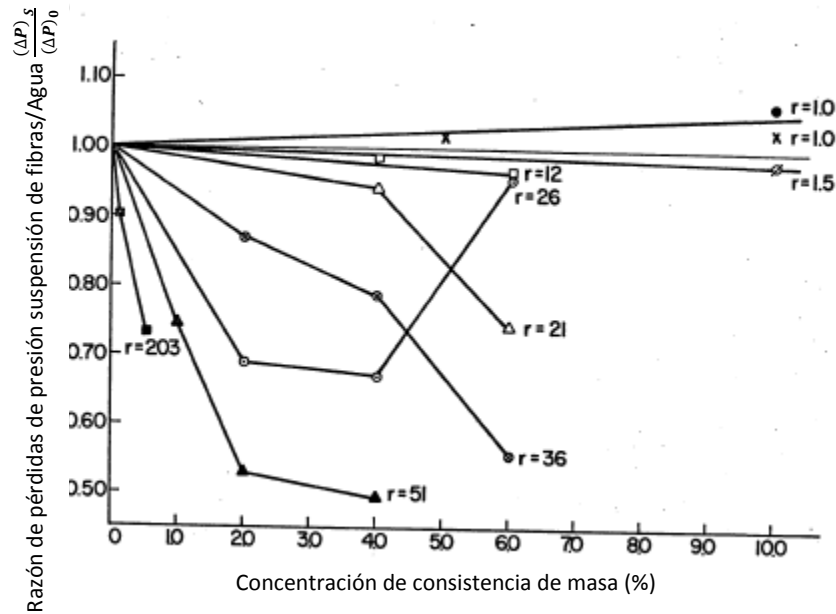
Numerosos estudios se han llevado a cabo para establecer correlaciones entre el porcentaje de reducción de arrastre, la relación de aspecto y la concentración, con el fin de estipular rangos sobre los cuales se hace efectiva una disminución en las pérdidas por fricción, sin embargo estos

estudios no han tenido éxito alguno. Esto se debe a que además de la concentración y la relación de aspecto, variables unitarias de las fibras como la rigidez, textura superficial y peso influyen sobre el grado de reducción de arrastre.

Tras una recopilación de datos relacionados con la reducción de fricción en suspensiones de fibras sintéticas, proporcionados por diferentes autores, Zandi realizó estudios en los cuales buscaba mantener unas características unitarias muy similares entre las diferentes fibras utilizadas, mediante una constancia en la gravedad específica; los resultados obtenidos (Tabla 5-3) muestran que entre mayor sea la relación de aspecto, mayor es la reducción de arrastre y menor es la concentración necesaria. Además, constató que variaciones de relación de aspecto entre 2 y 50 muestran mayores cambios en la reducción de arrastre, mientras que variaciones entre valores muy altos ( $r=203 \rightarrow r=367$ ) de relación de aspecto, se ven reflejados en cambios relativamente pequeños de reducción de arrastre. Descubrió igualmente que la influencia de la relación de aspecto se debe a cambios proporcionados a las fibras: cuando inicialmente, existen relaciones de aspecto bajas, significan fibras muy asimétricas; para relaciones de aspecto mayores, las fibras tienden ser cilíndricas y rígidas, y entre mayor sea la relación de aspecto, la fibra más se asemeja a un hilo flexible capaz de enredarse y formar flóculos; finalmente, para relaciones de aspecto muy altas, los cambios proporcionados a las fibras son menores, reflejándose en pequeñas fluctuaciones en la reducción de arrastre. El efecto de la relación de aspecto en la disminución de pérdidas por fricción, se puede apreciar claramente en la Gráfica 5-16.

Tabla 5-3. Reducción de fricción en suspensiones de fibras sintéticas. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).

Autor	Dia Tubería (in) Hor/ Vert	Partícula	Gravedad Específica	Longitud (in)	r	C%	$\frac{(\Delta P)_S}{(\Delta P)_0}$	
(31)	2-H	Esferas de poliestireno	1.03	0.05	1	5.0	1.02	
						10.0	1.03	
						15.0	1.07	
(26)	2-V	Hexaedros de nylon	1.14	0.15		5.0	0.975	
						10.0	0.969	
						15.0	1.00	
(27)	2-H	Cubos poliméricos Cilindros de poliestireno	1.00	0.14	1.5	10.0	0.985	
						15.0	0.978	
						2.1	0.978	
(30)	2-V	Fibras de nylon	1.14	0.02	1.0	10.0	1.07	
						26	6.0	0.957
						4.0	0.688	
(31)	2-H	Fibras de nylon	1.14	0.11	203	6.0	0.985	
						4.0	0.985	
						6.0	0.985	
						4.0	0.985	
						4.0	0.496	
						51	4.0	0.532
						36	6.0	0.560
						4.0	0.790	
						21	6.0	0.737
						4.0	0.943	
						51	1.0	0.746
						0.20	367	0.10
0.50	0.732							
0.10	1.00							
0.20	0.877							
0.50	0.825							
(29)	2-V	Fibras de seda artificial	1.52	0.20	15.6	4.30	0.845	
						4.30	0.845	
						0.05	39.0	1.48
(28)	2-H	Fibras de seda artificial	1.52	0.25	370	2.44	0.693	
						2.90	1.00	
						0.20	0.905	
0.50	0.860							



Gráfica 5-16. Efecto de la relación de aspecto en la disminución de las pérdidas por fricción. Adaptada de: (Kerekes R., 1970).

Pese a los estudios de Zandi, aún no se tiene una correlación clara entre las diferentes variables expuestas, lo cual dificulta establecer una tendencia para la reducción de arrastre en las suspensiones de fibras, tal como se puede apreciar en la gráfica anterior, donde para un  $r=26$ , la curva de reducción de arrastre se comporta de manera extraña referente a las demás.

Hasta el momento se ha hablado sobre los factores que influyen sobre el fenómeno de reducción de arrastre, sin embargo, para entender el comportamiento de las suspensiones de fibras y el mecanismo que permite la reducción en las pérdidas por fricción, es necesario analizar primero la forma como intervienen en el flujo. El flujo de las suspensiones de fibras puede ser descrito a partir de dos categorías básicas: suspensiones de fibras heterogéneas y suspensiones de fibras homogéneas.

### 5.3.1. Suspensión de fibras heterogénea

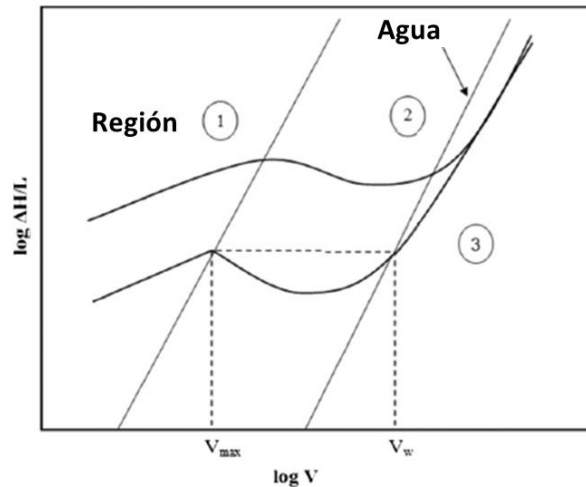
Son aquellas suspensiones para las cuales existe una separación parcial de las partículas sólidas del fluido. Esto se debe a que las partículas (fibras) son incapaces de seguir el movimiento del flujo; generalmente, la velocidad de las fibras es mucho menor que la del flujo, por lo cual tienden a depositarse en la pared de la tubería formando películas. Esta categoría está relacionada con suspensiones tipo III, o con fibras de alto peso, para las cuales hay una restricción de movimiento. Esta restricción de movimiento evita cualquier fenómeno de reducción de arrastre, por lo cual se afirma que la suspensión de fibras heterogénea no reduce pérdidas por fricción.

### 5.3.2. Suspensión de fibras homogénea

Son aquellas suspensiones para las cuales las partículas sólidas o fibras se mantienen en el fluido durante el flujo, es decir, las partículas se encuentran suspendidas en el fluido y su velocidad es casi igual a la del flujo por lo cual no es posible la separación parcial. Esta capacidad se debe a la libertad de movimiento de las fibras a consecuencia del movimiento Browniano y a las perturbaciones turbulentas, por lo cual se afirma que solo suspensiones tipo I y II suplen esta categoría. Es esta libertad de movimiento la que permite el fenómeno de reducción de arrastre, sin embargo, sólo las suspensiones tipo II son capaces de disminuir las pérdidas por fricción debido a su capacidad de floculación.

La disminución en las pérdidas por fricción bajo efecto de suspensiones de fibras homogéneas, está ligada a tres regímenes de flujo que ocurren secuencialmente a medida que aumenta la velocidad, hasta alcanzar el régimen turbulento y originar el fenómeno de reducción de arrastre. Inicialmente, a velocidades muy bajas, se desarrolla el primer régimen de flujo en el cual las fibras se desplazan a velocidad constante a lo largo de toda la sección transversal de la tubería; a este flujo se le conoce como flujo de pistón (Región 1, Gráfica 5-17), debido a su semejanza con el movimiento de dicho elemento. A medida que se aumenta la velocidad en el flujo, se desarrolla el segundo régimen, conocido como flujo anular, en el cual una capa de fluido rodea la suspensión de fibras e impide el contacto con la pared de la tubería (Región 2, Gráfica 5-17). Entre mayor sea la velocidad del flujo, las fibras se ven obligadas a concentrarse en un núcleo cada vez más pequeño; de igual forma, el grosor del flujo anular cada vez es mayor, causando un decrecimiento en el esfuerzo cortante en la pared de la tubería, y en consecuencia, se produce un decrecimiento en las pérdidas por fricción (Región 2 entre el pico y el mínimo, Gráfica 5-17). A medida que el nivel de velocidad aumenta, el núcleo de la suspensión de fibras se vuelve cada vez más pequeño, y de forma simultánea, el flujo anular se convierte en turbulento hasta el punto en que destruye el núcleo, dando origen al tercer régimen llamado flujo de mezclado. En este último régimen las fibras se mezclan en la totalidad del flujo formando una suspensión homogénea; a partir de este momento se da un flujo turbulento a lo largo del diámetro y se origina el fenómeno de reducción de arrastre, por lo cual la curva del fluido con la suspensión de fibras (curvas continuas curvilíneas) es mucho menor que la del fluido por sí solo, en este caso el agua (Región 3, Gráfica 5-17) (Derakhshandeh, Kerekes, Hatzikiriakos, & Bennington, 2011).

Dado que las suspensiones de fibras no se han probado en crudos pesados, la Gráfica 5-17 se construye a partir de experimentos de suspensiones de fibras en agua.



Gráfica 5-17. Comparación de curvas de pérdidas por fricción entre fluido (agua) con suspensión de fibras y fluido (agua) por sí solo. Adaptada de: (Derakhshandeh, Kerekes, Hatzikiriakos, & Bennington, 2011).

La gráfica anterior expone los tres regímenes nombrados, mediante la relación del cambio en la altura hidráulica  $\frac{\Delta H}{L}$  (eje de las ordenadas), y la velocidad  $V$  (eje de las abscisas), en una escala logarítmica para 2 mezclas diferentes de suspensiones de fibras y agua, y agua sola. Se observa claramente cómo en la región 3 existe un fenómeno de reducción de arrastre, ya que la curva de agua por sí sola (línea señalada) muestra mayores pérdidas por fricción.

#### 5.3.2.1. Reducción de arrastre en suspensión de fibras homogénea

El mecanismo de reducción de arrastre en suspensiones de fibras homogéneas puede ser explicado mediante dos hipótesis igualmente válidas, las cuales surgen a partir de la forma como se analice la suspensión, ya sea una Suspensión Continua, analizada como un fluido que en su totalidad es capaz de generar reducción de arrastre a consecuencia de propiedades viscoelásticas adquiridas por el efecto de las fibras, o, una Suspensión Discontinua, donde la reducción de arrastre se relaciona con la acción individual de las partículas unitarias o en forma de aglomeraciones (flóculos), presentes en la suspensión.

La aplicación del análisis del fenómeno de reducción de arrastre como una Suspensión Continua depende de la capacidad individual de las fibras en seguir el movimiento del flujo en dos situaciones distintas:

- Capacidad de movimiento en la dirección del flujo:  
 La inhabilidad de la fibra para seguir el movimiento del fluido en dirección del flujo se denomina “*slip*” (Ilustración 5-12), término que describe la velocidad relativa entre la fibra y el fluido, es decir, si la velocidad promedio de las fibras en el flujo difiere considerablemente de la del fluido; entonces se afirma que existe “*slip*”, y por lo tanto, la

suspensión no puede ser considerada continua. Es posible determinar si una suspensión incurre o no en “slip”, mediante la siguiente desigualdad:

$$\frac{\bar{V} - V_p}{\bar{V}} \leq 0.021$$

donde  $V_p$  es la velocidad promedio de las fibras en el flujo y  $\bar{V}$  es la velocidad promedio del fluido. Si la desigualdad se cumple, significa que la velocidad de las fibras difiere de la del fluido en una magnitud menor o igual al 2,1%, por lo tanto, tienen la capacidad de moverse con el flujo en la misma dirección (no “slip”) y la suspensión puede ser considerada como una Suspensión Continua. De lo contrario, se afirma que la suspensión incurre en “slip” y debe ser considerada como una Suspensión Discontinua.

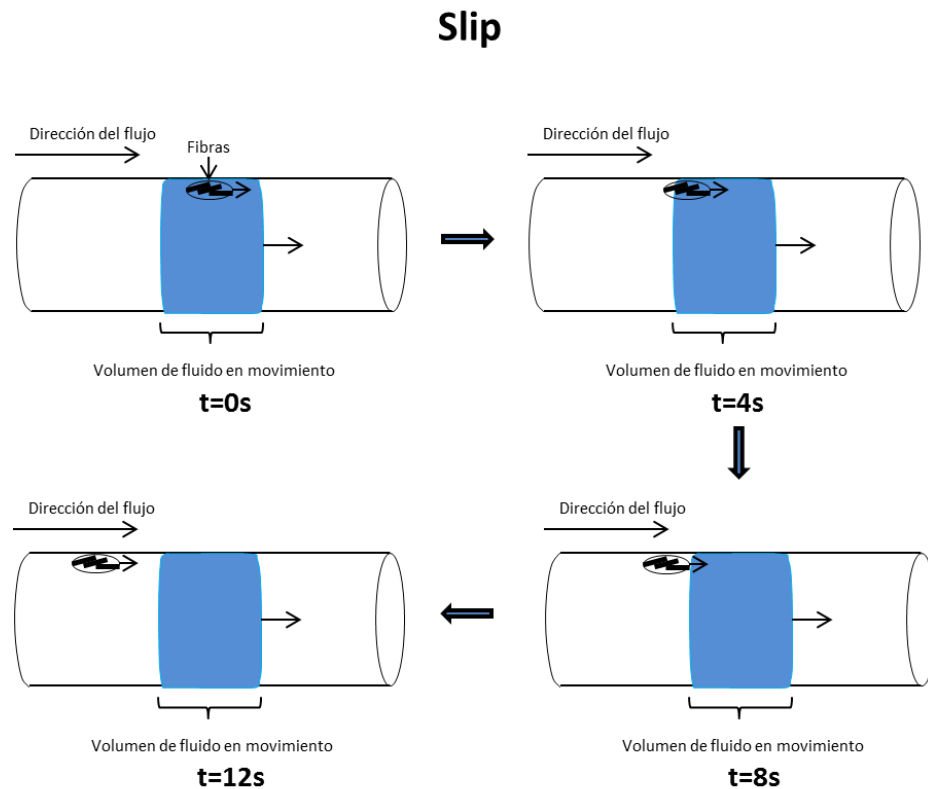


Ilustración 5-12. Efecto Slip. Fuente: (Autor).

- Capacidad de movimiento en las fluctuaciones turbulentas:  
 El movimiento de las fibras en dirección de las fluctuaciones turbulentas (dirección normal al movimiento del flujo), puede dar origen a una velocidad relativa entre las fibras y el fluido. Las fluctuaciones turbulentas son producidas por el movimiento rotatorio de pares ordenados de vórtices (vórtices padre) orientados en la dirección del flujo, los cuales giran en sentido contrario, succionando el fluido de la región cerca a la pared de la tubería y

expulsándola hacia el centro de la tubería (Ilustración 5-13), lo cual genera una zona de convergencia de flujo en el plano de la pared (zona resaltada en rojo) (Bohórquez, 2012). Esta zona de convergencia da origen a los denominados *Streaks*, definidos como una estructura turbulenta orientada en el sentido del flujo que define la trayectoria del fluido impulsado por el efecto de los vórtices. Esta trayectoria se caracteriza por una zona de bajas velocidades cerca a la pared de la tubería, la cual a medida que migra hacia el centro de esta, aumenta su velocidad hasta el punto en que la velocidad perpendicular al flujo puede llegar a ser la mitad de la velocidad en sentido del flujo, culminando en un fenómeno de estallido o *Bursting* en el cual la velocidad cambia abruptamente, generando una oscilación en el *Streak*, finalizando con la desintegración en pequeños movimientos turbulentos que regresan a la pared de la tubería (Ilustración 5-14).

La capacidad de movimiento de las fibras en las fluctuaciones turbulentas, radica en la capacidad de seguir el movimiento del fluido a lo largo de la trayectoria del *Streak*, obediendo las fluctuaciones de velocidad que se generan en este.

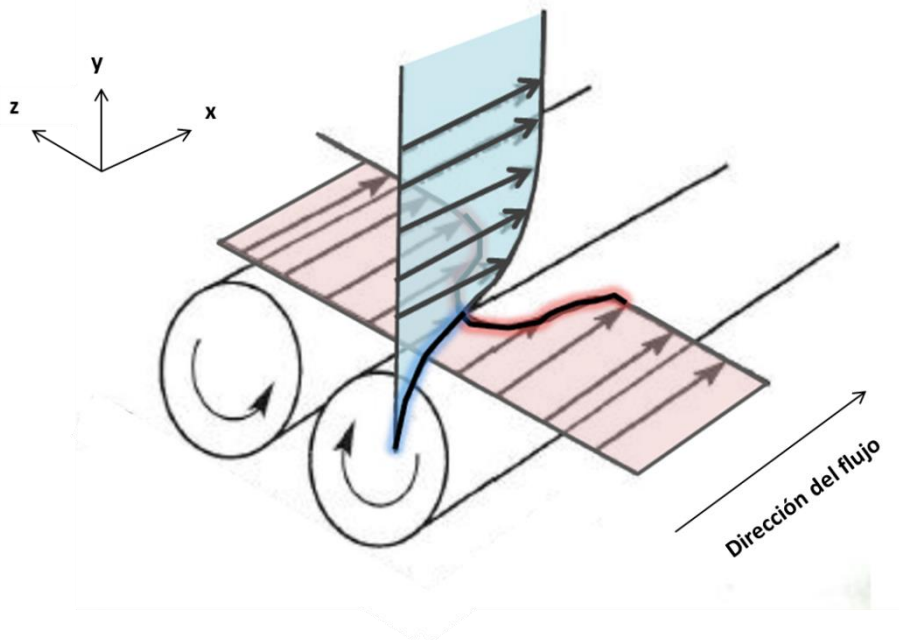


Ilustración 5-13. Efecto de los vórtices en el perfil de velocidades. Basada en: (Bohórquez, 2012).



Ilustración 5-14. Movimiento de un *streak* hacia el centro de la tubería. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).

Según Lumley, el criterio bajo el cual se determina la capacidad de las fibras para seguir el movimiento en las fluctuaciones turbulentas, está ligado a la evaluación de tres parámetros:

- a) La longitud total individual de las fibras debe ser mucho menor que la longitud total individual del vórtice más corto desarrollado en el flujo. Se debe tener en cuenta que la longitud del vórtice más corto desarrollado, no precisamente tiende a cero, ya que para la existencia de estas estructuras es necesario una longitud inicial que contrarreste los efectos de la viscosidad del fluido. De esto se infiere que se debe cumplir con:

$$L \ll \lambda_k$$

donde  $\lambda_k$  es la escala Kolmogorov<sup>22</sup> de la longitud del vórtice.

- b) El número de Reynolds turbulento correlacionado con la longitud de la fibra debe ser pequeño. La correlación del número de Reynolds y la longitud de la partícula está dada por:

$$Re = \frac{v' * L}{\nu}$$

**Ecuación 5-23. Número de Reynolds turbulento con base en la longitud de la fibra.**

donde  $v'$  son las fluctuaciones de velocidad en dirección del flujo y  $\nu$  es la viscosidad cinemática. Existe cierta controversia sobre la clase de viscosidad cinemática a utilizar, debido a que las suspensiones de fibras son materiales viscoelásticos y por lo tanto de viscosidad varía con el esfuerzo cortante, por lo

<sup>22</sup> Representa la menor longitud posible que un vórtice puede tener.



cual no es posible obtener una sola magnitud para el fluido ya que la distribución de esfuerzos a lo largo del diámetro de la tubería no es constante. Algunos autores como Eissenberg y Bougue, utilizan en sus estudios la viscosidad cinemática de la mezcla (fluido – suspensión) en la región cercana a la pared de la tubería donde el esfuerzo cortante es mayor. Otros autores, como Thomas, utilizan la viscosidad cinemática de la mezcla para las tasas más altas de cortante aplicado. No obstante, autores como Murdoch y Kearsey utilizan la viscosidad cinemática del medio en que se encuentra la suspensión (fluido por si solo), en el caso de la hidráulica de oleoductos, sería la viscosidad cinemática del crudo bombeado.

- c) El tiempo de relajación de las fibras (tiempo en que se libera el esfuerzo cortante), debe ser mucho menor al tiempo que toma disminuir la longitud del vórtice más largo sobre el cual son eficientes las fibras, a la escala de longitud Kolmogorov, este tiempo recibe el nombre de escala temporal de Kolmogorov. En otras palabras, es el tiempo que requiere la suspensión de fibras para contrarrestar la elongación de los vórtices mayores sobre los cuales es posible su efecto. Se debe cumplir entonces con la siguiente fórmula:

$$T_R = \frac{L^2}{9 * v} * \left( 2 * \left( \frac{\rho_S}{\rho} \right) + 1 \right) \ll T_K$$

donde  $T_R$  es el tiempo de relajación promedio de las fibras,  $\rho_S$  es la densidad de la suspensión,  $\rho$  es la densidad de la mezcla (fluido + suspensión de fibras) y  $T_K$  es la escala temporal Kolmogorov.

Si se cumplen los tres parámetros expuestos se afirma que la suspensión de fibras tiene capacidad de movimiento en las fluctuaciones turbulentas, por lo cual es posible considerar la suspensión como una Suspensión Continua; de lo contrario, la suspensión es considerada como una Suspensión Discontinua.

El fenómeno de reducción de arrastre sólo puede ser analizado bajo la hipótesis de Suspensión Continua, si la suspensión tiene capacidad de movimiento en la dirección del flujo y capacidad de movimiento en las fluctuaciones turbulentas; por el contrario, si la suspensión de fibras no cumple con ninguno de los dos criterios o cumple sólo con uno, se debe analizar bajo la hipótesis de Suspensión Discontinua.

Es necesario empezar por tener en cuenta que la mezcla de suspensiones de fibras y fluido se comporta como un material con propiedades viscoelásticas; además, se debe comprender que la turbulencia se debe principalmente al efecto de los vórtices (fluctuaciones de velocidad en

dirección del flujo y perpendicular a este), ligado a su capacidad rotativa, la cual a su vez es consecuencia de la transferencia de momentum radial al interior de los mismos.

Teniendo esto claro, la hipótesis del fenómeno de reducción de arrastre en una Suspensión Continua plantea que la inyección de suspensiones de fibras se materializa en un incremento en la viscosidad de la mezcla, es decir, la mezcla es más viscosa que el fluido por sí solo. Sin embargo, en cualquier fluido newtoniano esto se traduciría en una mayor oposición al corte y a deformaciones tangenciales; en consecuencia, las pérdidas por fricción serían mucho mayores, pero teniendo en cuenta que la mezcla se comporta como un material viscoelástico y que para cualquier material viscoelástico un aumento en la viscosidad significa, además de una mayor oposición al corte, un mayor comportamiento elástico (la contribución elástica es mucho mayor que la contribución viscosa), entonces, se afirma que la inyección de suspensiones de fibras permite que el fluido esté gobernado por un comportamiento elástico, el cual impide que los vórtices se elonguen por el efecto del cortante en la pared de la tubería.

De alguna forma, la elongación de los vórtices se relaciona con la transferencia del momentum radial (principal causa de las fluctuaciones de velocidad y fenómeno turbulento), de tal manera que al impedirse la elongación de los vórtices es posible la supresión del fenómeno turbulento y una reducción en el arrastre. En la medida en que el efecto del fenómeno de reducción de arrastre (efecto de un mayor comportamiento elástico) sea mayor que el efecto de un incremento en viscosidad (mayor oposición al corte), es posible disminuir las pérdidas por fricción.

Existen dos hipótesis que sustentan la razón por la cual se da un aumento en la viscosidad, y en consecuencia, un mayor comportamiento elástico: la primera, propuesta por Dally y Bugliarello, sostiene que el aumento en la viscosidad y la elasticidad del fluido se debe a la floculación de las fibras, específicamente a los contactos mecánicos entre fibras que aunque permiten el movimiento de las fibras, simulan una elongación elástica que disipa el cortante en la pared de la tubería. La segunda hipótesis surge a partir de observaciones hechas por Carter, quien sostiene que la elasticidad se debe principalmente a las deformaciones propias de las fibras, las cuales se producen tras el enroscamiento individual de las mismas por el efecto del cortante.

Por otra parte, la hipótesis de Suspensión Discontinua relaciona el fenómeno de reducción de arrastre con la acción individual de los flóculos y unidades de fibras. Los flóculos y unidades de fibras establecen una región, entre un límite inferior ubicado a una distancia de un diámetro de fibra respecto a la pared de la tubería, y un límite superior denominado límite sólido, a una distancia equivalente a la longitud promedio de las fibras respecto al diámetro, sobre la cual es posible la interacción con los vórtices del fenómeno turbulento (Ilustración 5-15). Dado que esta región es relativamente pequeña respecto a la región sobre la cual es efectivo el fenómeno turbulento, la interacción de las partículas sólidas (flóculos y fibras) sólo es posible con los vórtices formados dentro del límite sólido, por lo cual el efecto de la suspensión de fibras afecta cierto sector de la turbulencia (Ilustración 5-16).

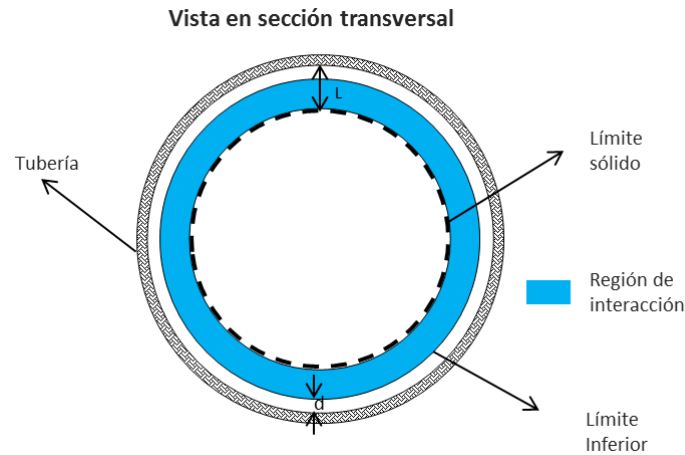


Ilustración 5-15. Región de interacción comprendida entre el límite sólido y el límite inferior. Fuente: (Autor).

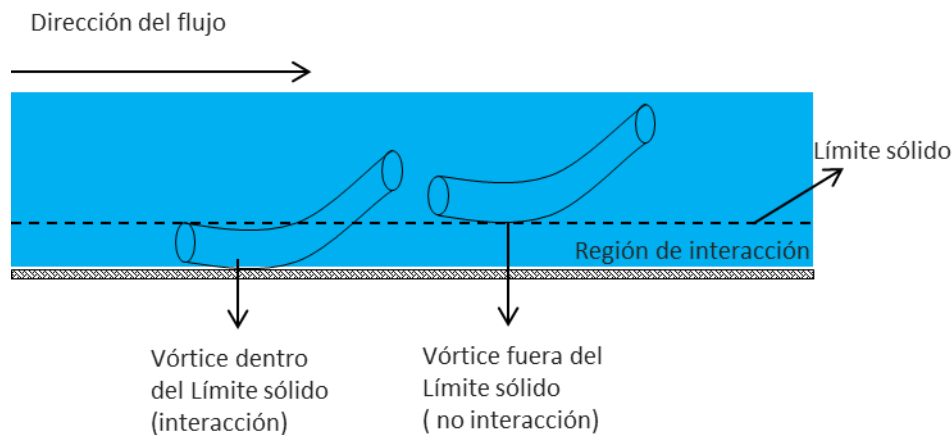


Ilustración 5-16. Interacción partículas - vórtice. Fuente: (Autor).

En la región de interacción, los flóculos y fibras tienden a organizarse en dirección del flujo al igual que los vórtices desarrollados dentro del límite sólido; de esta forma, la parte de las fibras o flóculos que interactúa con el vórtice es la sección transversal, por lo cual son posibles dos tipos de interacciones que dependen directamente del diámetro de la sección transversal:

- $d_v > d_p$ , si el diámetro del vórtice ( $d_v$ ) es mayor al diámetro de la partícula ( $d_p$ , flóculo o fibra), la partícula ejerce un arrastre viscoso sobre el movimiento radial del vórtice, mediante la interacción entre la superficie de la fibra y la superficie interna del vórtice, impidiendo la transferencia de momentum radial y suprimiendo las fluctuaciones turbulentas. En la Ilustración 5-17 se muestra este tipo de interacción, donde el esquema en rojo representa el vórtice y su movimiento radial, mientras que el esquema en negro representa las fibras y la oposición al movimiento radial del vórtice (arrastre viscoso).

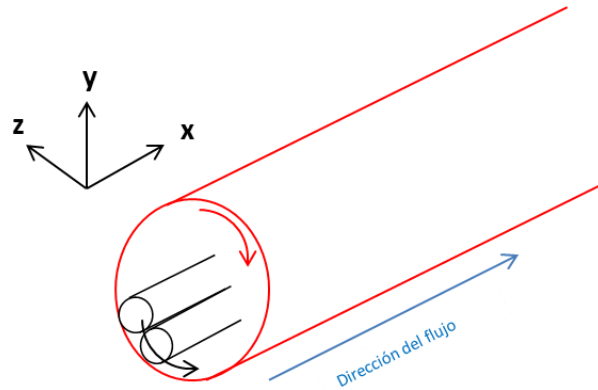


Ilustración 5-17. Interacción fibras - vórtice para  $d_v > d_p$ . Fuente: (Autor).

- $d_v < d_p$ , si el diámetro del vórtice ( $d_v$ ) es menor al diámetro de la partícula ( $d_p$ , flóculo o fibra), la partícula simplemente bloquea el vórtice por completo e impide cualquier movimiento radial, suprimiendo así las fluctuaciones turbulentas.

Si el mecanismo es interpretado en términos de una reducción turbulenta, debida a la oposición al momentum radial por un arrastre viscoso, o, simplemente por bloqueo total del vórtice, es claro que es la acción de las fibras en la región cercana a la pared de la tubería lo que causa el fenómeno de reducción de arrastre (Kerekes R. , 1970).

Teóricamente es posible cuantificar la reducción de arrastre de una Suspensión Discontinua bajo una interacción  $d_v > d_p$ ; bien se sabe que es dentro de la zona de interacción donde las fibras se alinean en dirección del flujo exponiendo el área superficial a los movimientos radiales del vórtice, por lo cual es posible afirmar que la reducción de arrastre es función del área superficial total proyectada de las fibras en la zona de interacción (Ecuación 5-24), área que depende del diámetro de la sección transversal ( $d_p$ ) y de la longitud total ( $L$ ) de la fibra.

$$\sum A_s \Big|_{y \approx d_p}^{y \approx L}$$

Ecuación 5-24. Área superficial total proyectada en la región de interacción.

En la ecuación anterior se expresa el área total superficial como una sumatoria de las áreas superficiales de las fibras presentes dentro de la región de interacción comprendida entre  $y \approx L$  (límite sólido) y  $y \approx d_p$  (diámetro de la partícula); la razón por la cual el límite inferior no corresponde a la pared de la tubería, se debe al efecto de rebote entre las partículas y la pared de la tubería que impide que las fibras se acerquen a menos de  $d_p$  . Ahora bien, es necesario evaluar

el área proyectada dentro de estos límites; dado que el área proyectada depende de la cantidad de fibras presentes dentro de la región de interacción, es de vital importancia encontrar la concentración de la suspensión en dicha región para su cálculo; sin embargo, por el efecto de rebote esta concentración difiere de la concentración total de la suspensión. Según Kerekes, la concentración en la región de interacción ( $C_W$ ) depende de la concentración total de la suspensión ( $C_m$ ) y de la uniformidad de dispersión de las fibras a lo largo del radio de la tubería. Para suspensiones tipo II, la uniformidad de dispersión está directamente relacionado con la frecuencia de colisiones entre fibras  $F_c$ . De esta manera se tiene:

$$C_W = \Phi (F_c) * C_m$$

**Ecuación 5-25. Concentración de la suspensión en la región de interacción.**

donde  $\Phi (F_c)$  representa la uniformidad de dispersión en función de la frecuencia de colisiones. Teniendo en cuenta que en suspensiones tipo II, las colisiones entre fibras ocurren principalmente debido a movimientos rotacionales, es posible estimar  $F_c$  en función del número de fibras dentro de un volumen esférico de diámetro igual a la longitud de la fibra promedio (número de aglomeración,  $N_c$ ) y la frecuencia rotacional de una fibra individual ( $\omega$ ):

$$F_c = \Phi (N_c \omega)$$

**Ecuación 5-26. Frecuencia de colisiones entre fibras.**

La frecuencia rotacional de una fibra individual depende de las condiciones del flujo, su explicación y cálculo se sale del alcance de este proyecto.

Dado que  $N_c$  depende de  $C_m$  y  $r$  (relación de aspecto) se obtiene:

$$F_c = \Phi (C_m r)$$

**Ecuación 5-27. Frecuencia de colisiones entre fibras.**

Finalmente, la concentración en la región de interacción puede ser expresada como:

$$C_W = \Phi (C_m r) * C_m$$

**Ecuación 5-28. Concentración de la suspensión en la región de interacción.**

Una vez obtenida la concentración en la región de interacción, es posible cuantificar el área superficial total proyectada mediante la siguiente relación:

$$\sum A_s = N_w * L * d$$

**Ecuación 5-29. Área superficial total proyectada en la región de interacción.**

donde  $N_w$  es el número total de fibras en la región de interacción, evaluado a partir del número de densidad de fibras ( $n_w$ ) y el volumen de la sección transversal de la región de interacción ( $V_w$ ) en la siguiente relación:

$$N_w = n_w * V_w$$

**Ecuación 5-30. Número total de fibras en la región de interacción.**

donde  $n_w$  es la cantidad de fibras por unidad de volumen dada por la razón entre la concentración en la región de interacción y el volumen individual de una fibra promedio:

$$n_w = \frac{C_w * 4}{L * d^2 * \pi}$$

**Ecuación 5-31. Densidad de fibras.**

y  $V_w$  es el volumen transversal de la región comprendida entre los límites de la región de interacción (Ilustración 5-15):

$$V_w = \frac{\pi}{4} * [(D - 2 * K_1 * d)^2 - (D - 2 * K_2 * L)^2]$$

**Ecuación 5-32. Volumen transversal de la región de interacción.**

donde  $D$  es el diámetro de la tubería,  $K_1$  y  $K_2$  son factores dependientes de la velocidad media del flujo que alteran los límites inferior y superior respectivamente; sin embargo, como se verá más adelante en el presente proyecto, estos factores afectan muy poco dichos límites por lo cual en ocasiones no es necesario tenerlos en cuenta.

Es posible cuantificar la reducción de arrastre mediante una razón entre las pérdidas por fricción del fluido con suspensión de fibras y el fluido sin suspensión de fibras ( $\frac{H_s}{H_0}$ ). Según Kerekes, esta relación es una función de la razón entre el área superficial total proyectada y el área de la pared interna de tubería:

$$\frac{H_s}{H_0} = \phi \left( \frac{\sum A_s \Big|_{y \approx d}^{y \approx L}}{A_w} \right)$$

**Ecuación 5-33. Reducción de arrastre en Suspensión de fibras Discontinua, para  $d_v > d_p$ .**

Lo cual se traduce en:

$$\frac{H_s}{H_0} = \phi \left( \frac{(N_c * L * d)}{\pi * D} \right) = \phi \left( \frac{\phi(C_m r) * C_m}{d} * (K_2 * L - K_1 * d) * \left( 1 - \frac{K_2 * L - K_1 * d}{D} \right) \right)$$

Esta ecuación se puede simplificar sustituyendo los valores aproximados para  $K_1$  y  $K_2$  ( $K_1 \approx 1$  y  $K_2 \approx 1$ ), y suponiendo que en la mayoría de las suspensiones tipo II, la longitud de la fibra es mucho menor que el diámetro de la tubería ( $L \ll D$ ) y mucho mayor que diámetro de la fibra misma ( $L \gg d$ ), originando que el último término tienda a 1 ( $1 - \frac{K_2 * L - K_1 * d}{D} \approx 1$ ). Bajo estas consideraciones se obtiene:

$$\frac{H_s}{H_0} = \phi \left( \frac{\phi(C_m r) * C_m}{d} * (L - d) \right)$$

**Ecuación 5-34.Reduccion de arrastre en Suspensión de fibras Discontinua, para  $d_v > d_p$ .**

A pesar de las correlaciones establecidas por Kerekes y sus intentos por descifrar la reducción de arrastre teóricamente, hasta el momento no se ha logrado establecer una relación clara para cuantificar la reducción de arrastre, tanto para Suspensiones Continuas como Suspensiones Discontinuas; esto se debe a la difícil predicción del comportamiento tanto de las fibras como de las numerosas variables que intervienen en el mismo. No obstante, la mayoría de los investigadores recurren a la modelación experimental para fundamentar sus hipótesis y determinar la reducción en las pérdidas por fricción.

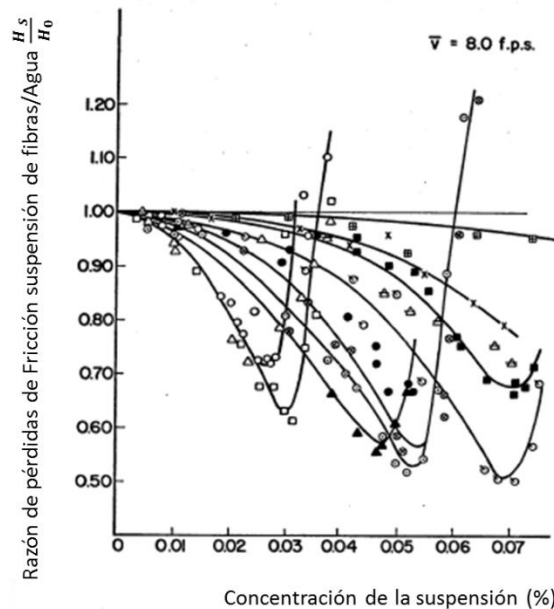
Con el fin de caracterizar el flujo bajo el efecto de las suspensiones de fibras y cuantificar la reducción de arrastre, se analizarán los resultados experimentales obtenidos por Kerekes, para los cuales se modeló el flujo del agua con suspensiones de fibras cilíndricas de nylon a diferentes concentraciones y diferentes relaciones de aspecto, teniendo siempre como referente el flujo del agua sin ninguna modificación. A continuación se muestran los tipos de fibras utilizadas por Kerekes en sus estudios:

**Tabla 5-4. Tipos de fibras experimentales. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).**

Datos Experimentales

Punto	Fibra mm x den	r
●	2.00 x 18	31.0
○	2.00 x 6	72.5
■	1.50 x 18	25.5
▲	1.50 x 6	58.4
△	1.50 x 3	73.7
x	1.00 x 20	20.6
⊗	1.00 x 6	35.4
⊙	1.00 x 3	47.2
□	1.00 x 1-1/2	69.7
⊞	0.50 x 20	12.0
⊠	0.50 x 3	24.6
⊗	0.50 x 1-1/2	42.7

Los resultados obtenidos permitieron analizar el efecto de las fibras sobre el flujo desde dos perspectivas diferentes. Por una parte, es posible analizar el efecto de la concentración, la relación de aspecto y la velocidad media del flujo en la reducción de arrastre de las suspensiones de fibras. Por otra parte, se puede analizar también el efecto del fenómeno de reducción de arrastre sobre los perfiles de velocidad con el fin de comprender mejor la forma como se atenúa el fenómeno turbulento.



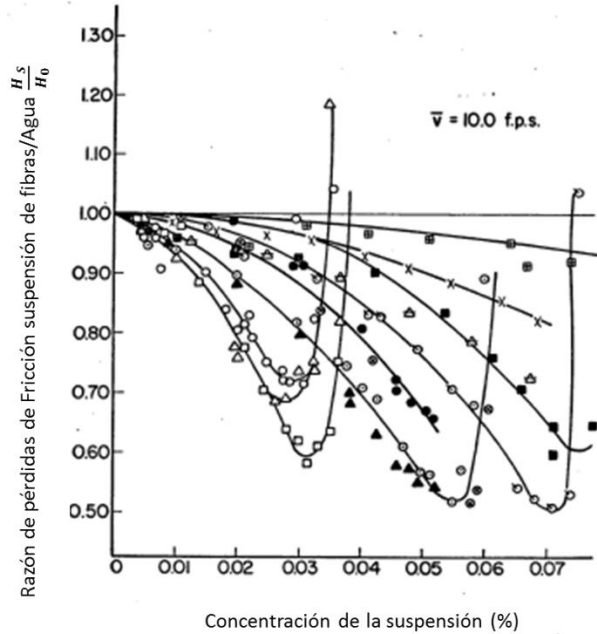
**Gráfica 5-18. Efecto de la concentración y relación de aspecto en suspensión de fibras de Nylon para una velocidad media de flujo de 8 p/s. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).**

En la gráfica anterior se corrobora el efecto de la relación de aspecto y la concentración expuesto anteriormente, donde para altas relaciones de aspecto se necesitan bajas concentraciones con el fin de alcanzar altos porcentajes de reducción de arrastre. De igual forma, se aprecia la existencia de una segunda concentración crítica, a partir de la cual el fenómeno de reducción de arrastre disminuye hasta el punto en que el arrastre llega a ser mayor que el del fluido por si solo (agua).

Es importante analizar el efecto de la velocidad sobre el fenómeno de reducción de arrastre. Al comparar la Gráfica 5-18 y la Gráfica 5-19, se nota claramente, cómo un cambio en la velocidad media del flujo no tiene grandes consecuencias sobre el fenómeno de reducción de arrastre, ya que las curvas para cada tipo de fibra no se ven modificadas en gran magnitud. Esto se debe a la poca sensibilidad de la región de interacción, en otras palabras, la región de interacción permanecerá casi igual y las fibras tendrán el mismo efecto sin importar qué tan grande es el cambio en la velocidad media. La única consecuencia de la velocidad, radica en un aumento en los coeficientes  $K_1$  y  $K_2$ , los cuales tal como se puede apreciar en la Tabla 5-5 son mínimos, por lo cual



el efecto sobre la región de interacción y en consecuencia sobre el fenómeno de reducción de arrastre es limitado.



Gráfica 5-19. Efecto de la concentración y relación de aspecto en suspensión de fibras de Nylon para una velocidad media de flujo de 10 p/s. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).

Tabla 5-5. Coeficientes K1 y K2. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).

Coeficientes K1 y K2 para diferentes velocidades medias de flujo

$\bar{v}$ p/s	$k_1$	$k_2$
4.0	1.098	+ 0.244
6.0	1.126	+ 0.245
8.0	1.072	+ 0.198
10.0	1.099	+ 0.214

Los resultados mostrados permiten identificar tres comportamientos en el fenómeno de reducción de arrastre que se afirma, ocurren para cualquier tipo de suspensión de fibras; el primero ocurre para el caso de disminuciones en las pérdidas por fricción menores al 5%, para las cuales, como se

puede apreciar en la Gráfica 5-19, el comportamiento no es lineal, es decir, no existe una proporcionalidad entre un incremento en la concentración y el fenómeno DR. El segundo comportamiento ocurre para  $DR \geq 5\%$ , el cual puede ser descrito como una tendencia lineal y que puede ser formulado por una ecuación de primer grado; sin embargo, esta ecuación depende de las características de la fibra tal y como se mostró en los planteamientos teóricos. Para suspensiones de nylon con las características mostradas en la Tabla 5-5, Kerekes establece la siguiente relación lineal:

$$\frac{H_s}{H_0} = K_1 - K_2 * (C_m * r)$$

**Ecuación 5-35. Reducción de arrastre en suspensiones de fibras de nylon.**

Existe un tercer comportamiento, ya antes nombrado, en el cual el arrastre empieza a aumentar hasta el punto en que se inhibe el fenómeno de reducción de arrastre.

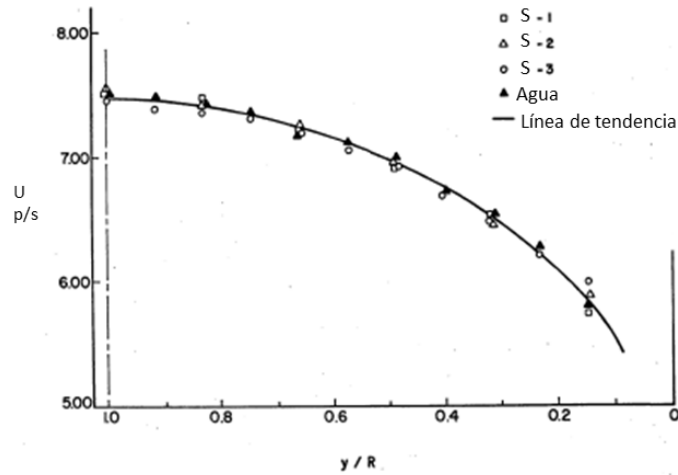
Para comprender mejor la forma como se atenúa el fenómeno turbulento y el efecto del fenómeno de reducción de arrastre sobre el flujo, es necesario analizar las variaciones en los perfiles de velocidad. Para este análisis Kerekes experimenta con un tipo de suspensión de fibras de nylon en concentraciones y relaciones de aspecto diferentes (Tabla 5-6), realizando entre 2 y 3 mediciones por cada suspensión (S-1, S-2, S-3, etc).

**Tabla 5-6. Suspensión de fibras utilizada para el cálculo de perfiles de velocidad. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).**

Fibra mm X den	c (%)	Cr
2.00 x 6	0.970	0.703
	1.82	1.32
	2.20	1.61
	2.61	1.89
	3.32	2.40

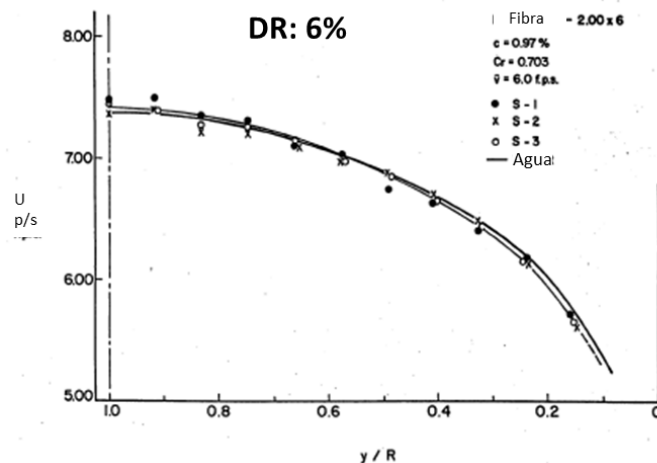
El análisis de los perfiles de velocidad permite identificar 4 instancias que reflejan el efecto de las suspensiones de fibras sobre el flujo; estas instancias reciben el nombre de subrégimenos turbulentos:

- Turbulencia newtoniana (Newtonian Turbulence en inglés):  
 Es el primer subrégimen, el cual ocurre a concentraciones muy bajas para las cuales no existe diferencia entre los perfiles de velocidad del fluido por sí solo y el fluido con la suspensión de fibras, no existe reducción de arrastre y por ende el fenómeno turbulento no se ve suprimido por el efecto de las fibras. El comportamiento del fluido con la suspensión es igual al fluido por sí solo, es decir, no existe un comportamiento viscoelástico por efecto de las fibras (Gráfica 5-20).

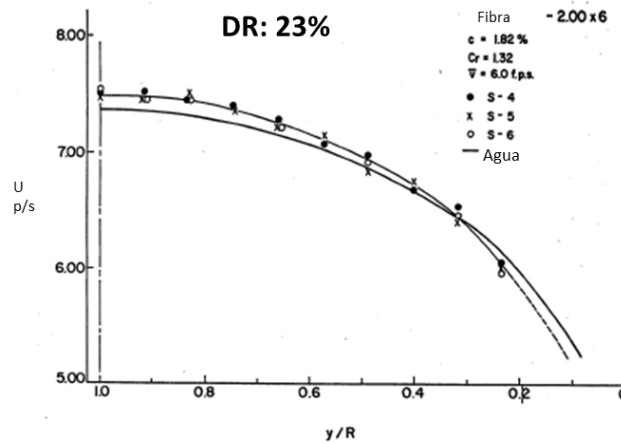


Gráfica 5-20. Perfil de velocidad Turbulencia Newtoniana. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).

- Turbulencia amortiguada (Damped Turbulence en inglés):  
 A medida que se aumenta la concentración, el perfil de velocidad tiende a laminarizarse, adquiriendo una forma puntiaguda en el centro de la tubería. La laminarización incrementa los gradientes de velocidad en la zona cercana a la pared de la tubería, manifestando la ocurrencia del fenómeno de reducción de arrastre en esta zona. El efecto de las fibras, aunque ocurre en la región cercana a la pared de la tubería, afecta el perfil total del flujo. El fluido en su totalidad corresponde a una suspensión tipo II, señalando la característica de este subrégimen (Gráfica 5-21 y Gráfica 5-22).



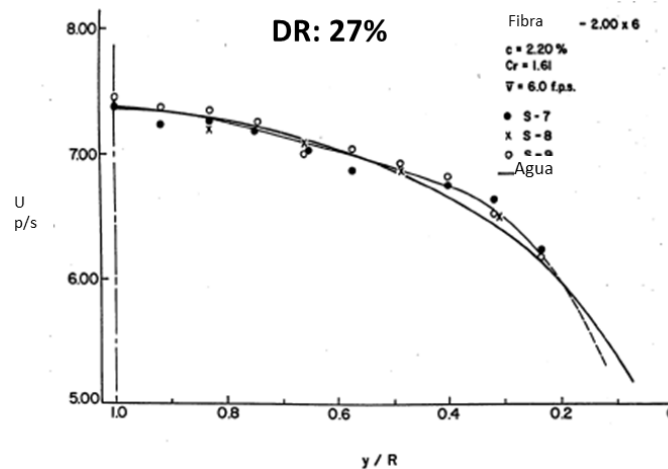
Gráfica 5-21. Perfil de velocidad Turbulencia Amortiguada. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).



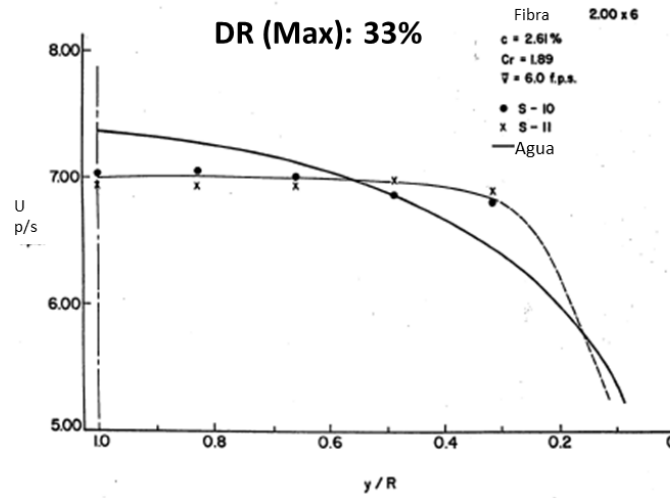
Gráfica 5-22. Perfil de velocidad Turbulencia Amortiguada. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).

- Turbulencia de pistón (Plug Turbulence):

Es el sub régimen turbulento en el cual se da la mayor reducción de arrastre, y esto se debe a que se alcanzan gradientes de velocidad muy altos cerca de la pared de la tubería. Ocurre a mayores concentraciones y se caracteriza por que la máxima reducción de arrastre se da en el momento en que la suspensión comienza a adquirir el estado tipo III en la región central de la tubería (debido al aumento de la concentración a medida que se aleja de la pared), aplanando el perfil de velocidad, mientras que en la región próxima a la pared de la tubería, la suspensión continúa en estado tipo II, lo que permite la supresión del régimen turbulento. Este sub régimen se caracteriza por la mezcla de los dos tipos de suspensiones (II y III); sin embargo, la turbulencia solo ocurre en la región cercana a la pared de la tubería (suspensión tipo II), debido a la formación de redes de fibras en el centro de la misma que hacen que el flujo se mueva a velocidad constante (Gráfica 5-23 y Gráfica 5-24).

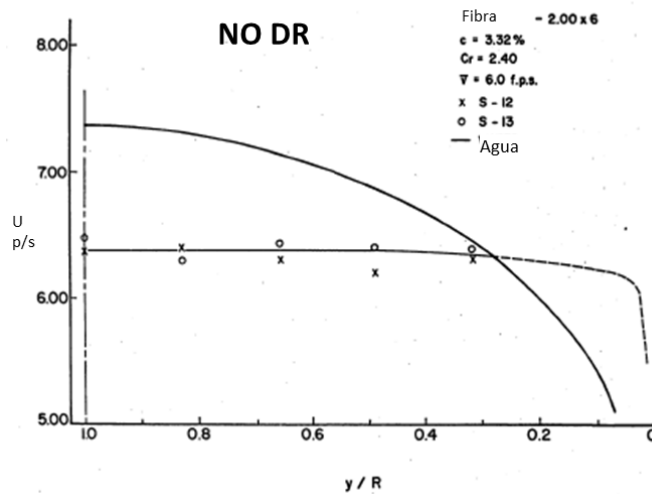


Gráfica 5-23. Perfil de velocidad Turbulencia de pistón. Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).



Gráfica 5-24. Perfil de velocidad Turbulencia de pistón (Max DR). Adaptada de: (Kerekes R. , 1970).

- Flujo de Pistón (Plug flow):  
 La última instancia no es un tipo de sub régimen turbulento sino un tipo de flujo en el cual existe una velocidad constante a lo largo del diámetro de la tubería. No existe ningún tipo de reducción de arrastre, por el contrario, el arrastre es mayor que el del fluido por sí solo. Este flujo se caracteriza por que el fluido en su totalidad corresponde a una suspensión tipo III.



Gráfica 5-25. Perfil de velocidad para el flujo de pistón (no DR). Adaptada de: (Kerekes R. J., 1970).

Las Suspensiones de Fibras aunque tienen un efecto relevante en el flujo del agua, tal y como se ha expresado a lo largo del documento, se desconocen aplicaciones en la hidráulica de oleoductos. Sin embargo, el desempeño comprobado teóricamente, sugiere que este tipo de agentes



reductores pueden ser una solución viable a la problemática de las pérdidas por fricción en el bombeo de crudos pesados y extra pesados.

Por otra parte, a diferencia de las Suspensiones de Fibras, existe un tipo de agente reductor que sí ha sido comprobado experimentalmente ante crudos pesados, e inclusive, se usa actualmente en la industria petrolera para el bombeo de este tipo de fluido. Se le denomina Agentes Reductores Poliméricos y su explicación se hará en el siguiente numeral.

#### 5.4. Polímeros

Los Agentes Reductores Poliméricos se definen como cadenas largas de macromoléculas formadas a partir de la unión de monómeros. Es el agente reductor más usado en la industria petrolera, destacándose además en usos relacionados con la medicina (supresión de aterosclerosis, prevención de muerte por shock hemorrágico), transporte de agua no potable en tuberías a presión y prevención de inundaciones en sistemas de alcantarillado, entre otras.

A diferencia de los agentes reductores abarcados hasta el momento, para los cuales la disminución en las pérdidas por fricción se debe a la formación de estructuras superiores como las micelas (Surfactantes) y flóculos (Suspensión de Fibras), las cadenas poliméricas interactúan con el flujo de manera individual, es decir, la supresión del fenómeno turbulento se debe a la suma de los efectos individuales de las cadenas poliméricas sobre el flujo mismo.

Este tipo de agentes reductores son los más estudiados hasta el momento. Se entiende que su capacidad de reducción de arrastre se debe al efecto sobre la subcapa laminar viscosa; no obstante, su efecto sólo puede ser concebido dentro del flujo turbulento, pues no se han registrado reducciones de arrastre en flujo laminar hasta el momento.

Al igual que las micelas en los surfactantes, las cadenas poliméricas son elementos que al ser inyectados al sistema en forma de solución, adquieren un comportamiento No Newtoniano; sin embargo, tienen la particularidad de no alterar el comportamiento del fluido sobre el cual actúan, por lo cual, si la condición del fluido es inicialmente Newtoniana, no importa la cantidad de polímero inyectado y su concentración, el fluido seguirá actuando como un fluido Newtoniano.

Su comportamiento es muy similar al de las micelas, con la diferencia de que sufren degradación por efecto de las deformaciones producidas por el esfuerzo cortante en la pared de la tubería. Su efectividad depende de variables como el peso molecular, la concentración, el número de Reynolds y el solvente utilizado. Dichas variables están correlacionadas entre sí.

Por una parte, al igual que los agentes reductores explicados hasta el momento, los agentes poliméricos necesitan de un cortante de activación y una tasa de aplicación de cortante (onset phenomenon); bien se sabe que estos parámetros se asocian con un número de Reynolds específico, a partir del cual se desarrolla el fenómeno de reducción de arrastre. Dicho cortante de activación está relacionado directamente con la naturaleza del polímero, en otras palabras, no

importa la concentración de las cadenas poliméricas, la forma como se inyecten o el tipo de fluido sobre el cual se inyecten, siempre y cuando se maneje el mismo polímero, el cortante de activación va a ser el mismo. Esta condición solo puede variarse manipulando el peso molecular de los monómeros que forman las macromoléculas poliméricas; un aumento en el peso molecular disminuye la magnitud del cortante de activación y la concentración necesaria para generar reducción de arrastre. Sin embargo, esta acción aumenta la tasa de degradación del polímero, por lo cual puede disminuir la eficiencia.

Generalmente los agentes reductores poliméricos están compuestos de monómeros de alto peso molecular; se utilizan comúnmente  $\alpha$ -olefinas por su condición elástica capaz de atenuar la turbulencia. Dado que este tipo de agentes son comúnmente cadenas largas y elásticas, es necesario que sean disueltos en un solvente o medio acuoso con agentes estabilizantes que impidan la aglomeración o enredamiento de dichas cadenas, con el fin de garantizar su funcionamiento una vez sean inyectados. Este tipo de solvente puede ser agua, alcohol, éter o algún tipo de hidrocarburo. Para las aplicaciones en la industria petrolera, se sobreentiende que es un hidrocarburo (Bohórquez, 2012). A continuación se muestra un cuadro donde se exponen algunos de los agentes poliméricos de mayor uso, cabe resaltar que los utilizados en la industria no son solubles en agua.

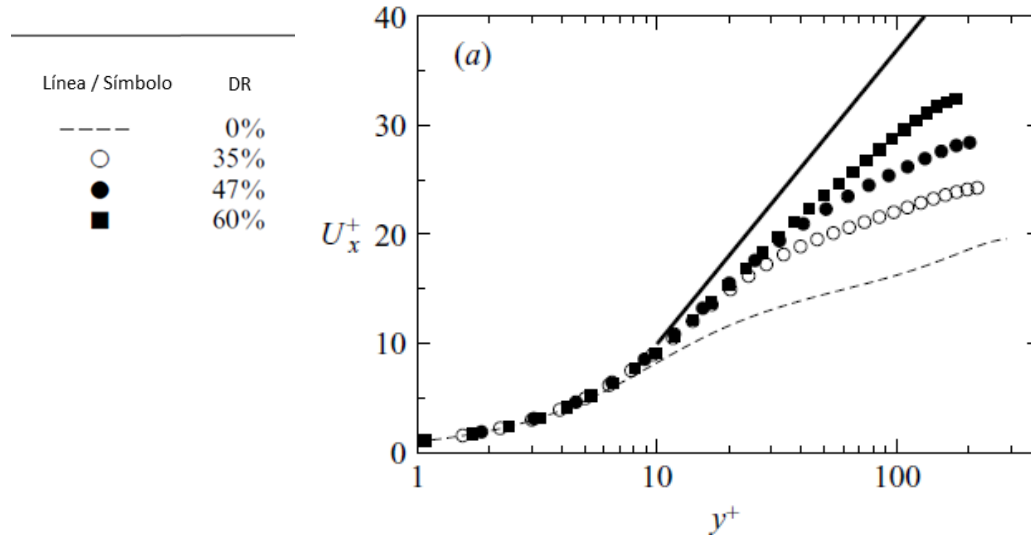
Tabla 5-7. Polímeros solubles y no solubles en agua. Fuente: (Bohórquez, 2012).

Soluble en agua	Soluble en Solvente
Poly(ethylene oxide)	Polyisobutylene
Polyacrylamide	Polystyrene
Guar gum	Poly(methyl methacrylate)
Xanthan gum	Polydimethylsiloxane
Carboxymethyl cellulose	Poly(cis-isoprene)
Hydroxyethyl cellulose	

#### 5.4.1. Fenómeno de reducción de arrastre en agentes poliméricos

Una vez inyectados los polímeros en forma de solución al sistema, la acción de reducción de arrastre se presenta, al igual que los agentes reductores vistos hasta el momento, en la región próxima a la pared de la tubería, exactamente en la sub capa laminar viscosa, donde la interacción entre polímeros y flujo ocurre en  $y^+ = 15$ . Sin embargo, esta interacción no incrementa los gradientes de velocidad en esta zona como es de esperarse partiendo del análisis de los agentes reductores ya indagados. Según Yves Dubief, el efecto de los agentes poliméricos radica en prolongar la subcapa laminar viscosa hacia la región turbulenta, manteniendo constante el perfil

de velocidad de la misma, con el fin de laminarizar el flujo y disminuir la región del perfil logarítmico de velocidad (Gráfica 5-26).



Gráfica 5-26. Perfil de velocidad para diferentes porcentajes de reducción de arrastre. Adaptada de: (DUBIEF, WHITE, TERRAPON, SHAQFEH, MOIN, & LELE, 2004).

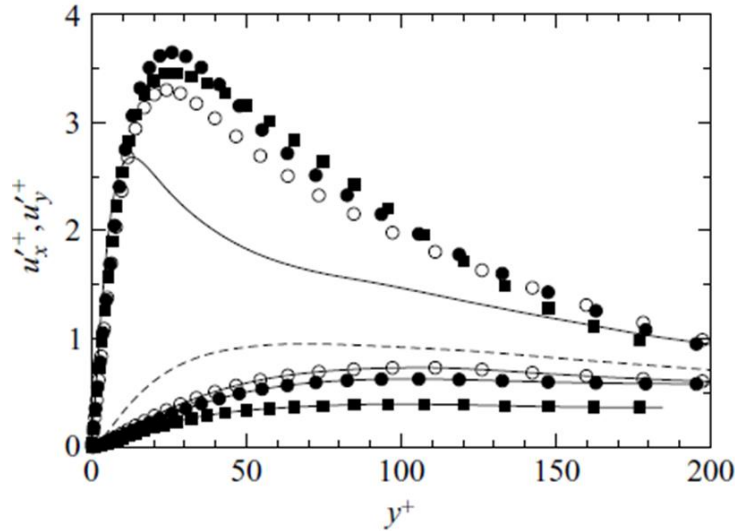
En la gráfica anterior se puede apreciar claramente la existencia de dos regímenes de reducción de arrastre debidos a la concentración, para los cuales el efecto de los polímeros sobre el flujo varía en cierto modo. El primer régimen se llama Régimen de Baja Reducción de Arrastre ( $DR < 40\%$ ); se caracteriza por que se estira la subcapa laminar viscosa y se reduce y traslada la región logarítmica del perfil de velocidades. No obstante, el perfil logarítmico del flujo con reducción de arrastre (perfil del símbolo circular vacío) es idéntico al del flujo sin reducción de arrastre (perfil de la línea punteada). En este régimen también se incrementan las fluctuaciones en la dirección del flujo y se atenúan las fluctuaciones normales al flujo (Gráfica 5-27).

El segundo régimen se denomina Régimen de Alta Reducción de Arrastre ( $DR > 40\%$ ); se caracteriza por que se estira un poco más la subcapa laminar viscosa; la región logarítmica es más pronunciada asemejándose cada vez más a un perfil laminar. A diferencia del régimen anterior, las pendientes del perfil logarítmico cambian; en la Gráfica 5-26 se puede apreciar como la pendiente del perfil de velocidad de la región logarítmica del flujo, para el cual se tiene una reducción de arrastre del 60% (perfil del símbolo rectangular relleno), es mucho más pronunciada que el perfil del flujo sin reducción de arrastre (perfil de la línea punteada). En este régimen también se incrementan las fluctuaciones en la dirección del flujo y se atenúan las fluctuaciones normales al flujo (Gráfica 5-27).

Igualmente, se observa de forma clara en la gráfica anterior, que para todos los porcentajes de reducción de arrastre, el perfil de velocidad en la subcapa laminar viscosa es igual, con lo cual se corrobora la afirmación planteada.



Dubief aclara que en forma simultánea al estiramiento de la subcapa laminar viscosa, se incrementan las fluctuaciones de velocidad en el sentido del flujo, y se atenúan las fluctuaciones en sentido perpendicular al flujo (fluctuaciones que crean diferentes zonas de velocidad que originan en fenómeno turbulento), lo que permite atenuar el fenómeno turbulento. La atenuación de las fluctuaciones perpendiculares al flujo, se debe principalmente al efecto que tienen los polímeros sobre los vórtices padre como se verá más adelante.



Gráfica 5-27. Fluctuaciones en dirección del flujo ( $u_x^+$ , símbolos despegados) y perpendiculares a este ( $u_y^+$ , símbolos unidos por líneas), para diferentes porcentajes de reducción de arrastre. Adaptada de: (DUBIEF, WHITE, TERRAPON, SHAQFEH, MOIN, & LELE, 2004).

Se ha explicado el efecto que causan los polímeros en el flujo turbulento, pero para comprender mejor las razones de los cambios en el comportamiento del flujo, es necesario entender la forma como interactúan los polímeros con las estructuras turbulentas y su efecto sobre las mismas.

La reducción de arrastre a consecuencia de los agentes poliméricos a escala turbulenta, se debe a la combinación de dos efectos: oposición al estiramiento de los vórtices padre y atenuación de los movimientos oscilatorios de turbulencia.

#### 5.4.1.1. Oposición al estiramiento de los vórtices padre

Claramente el estiramiento de los vórtices padre es un evento que contribuye al desarrollo del fenómeno turbulento. No obstante, la incapacidad de ocurrencia de este evento bajo la presencia de los agentes reductores poliméricos se debe a una propiedad particular de este tipo de agentes, denominada viscosidad de elongación. Este término es una medida de la resistencia al flujo elongado<sup>23</sup> de los vórtices padre, entre mayor sea su magnitud menor es el desarrollo (elongación) de dichos vórtices.

<sup>23</sup> Estiramiento de los vórtices padre a consecuencia de los esfuerzos cortantes en la pared de la tubería.



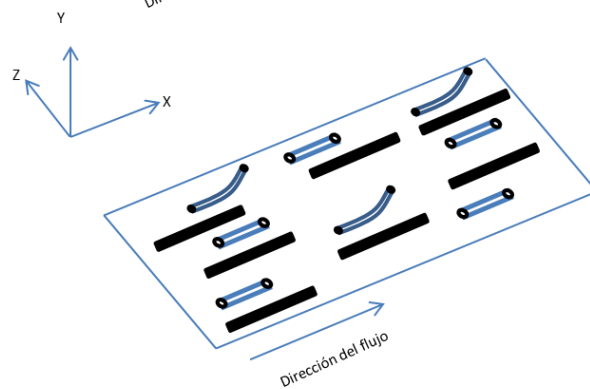
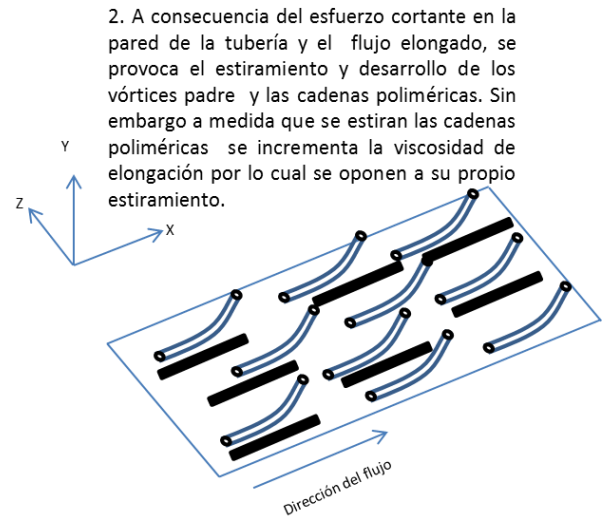
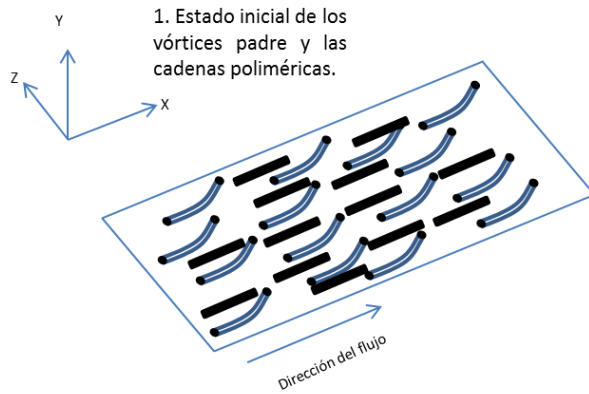
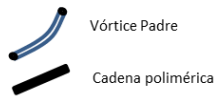
La oposición a la elongación de los vórtices padre se da a consecuencia de una oposición de las cadenas poliméricas a su propio estiramiento, es decir, la viscosidad de elongación es una propiedad que describe la resistencia al estiramiento de las cadenas poliméricas, pero dado que dichas cadenas están alineadas en dirección del flujo en la región de desarrollo de los vórtices padre, en consecuencia estos se ven afectados por dicha propiedad al ser restringidos en su estiramiento, atenuándolos en cierta forma (Ilustración 5-18). En este orden de ideas, si los vórtices padre son aplacados por las cadenas poliméricas, no se crearan vórtices hijo, y el efecto repetido de esto disminuirá la turbulencia significativamente (Bohórquez, 2012).

Entre más se estiren las cadenas poliméricas, mayor será la oposición al estiramiento y por ende la viscosidad de elongación. Esto se debe a que al igual que las micelas formadas por los surfactantes, los polímeros son materiales viscoelásticos que desarrollan esfuerzos normales cuando son sometidos a deformaciones longitudinales (Ilustración 5-19). Es la diferencia de esfuerzos normales ( $N_1$ ) la que impide el estiramiento de las cadenas poliméricas, pues entre mayor sea  $N_1$  mayor es la viscosidad de elongación (Ecuación 5-36).

$$\eta_e = \frac{N_1}{\dot{\epsilon}}$$

Ecuación 5-36. Viscosidad de elongación.

donde  $\dot{\epsilon}$  es la tasa a la cual se estiran las cadenas poliméricas, está directamente relacionada con el esfuerzo cortante al cual es sometido el polímero en la pared de la tubería.



**Ilustración 5-18. Oposición al estiramiento de los vórtices padre. Fuente: (Autor).**

Para entender mejor el efecto de la diferencia de esfuerzos normales, se va a suponer que se está observando una cadena polimérica que está siendo sometida a esfuerzos cortantes, y se está estirando (Ilustración 5-19 (a)). A medida que se aumenta el esfuerzo cortante, se empieza a deformar la cadena polimérica y se empiezan a desarrollar esfuerzos normales al plano del cortante ( $T_{22}$ ) y al plano perpendicular al cortante ( $T_{11}$ ), los cuales tratan de mantener la cadena en su estado inicial (Ilustración 5-19(b)). Sin embargo, a medida que se deforma más la cadena, el esfuerzo  $T_{22}$  es cada vez menor, lo que facilita el adelgazamiento de la misma. Al mismo tiempo los planos del esfuerzo  $T_{11}$  sufren una mayor deformación (Ilustración 5-19 (c)). En este orden de ideas, entre mayor sea la diferencia de esfuerzos normales, mayor será la fuerza necesaria para contrarrestar la deformación axial de la cadena polimérica (mayor será  $T_{11}$ ). Por lo tanto, entre mayor sea  $N_1$  la oposición al estiramiento será mayor.

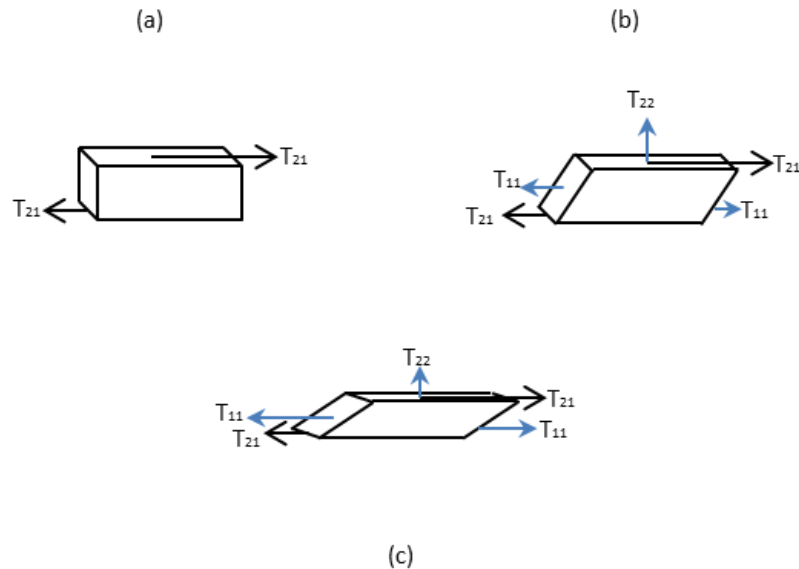
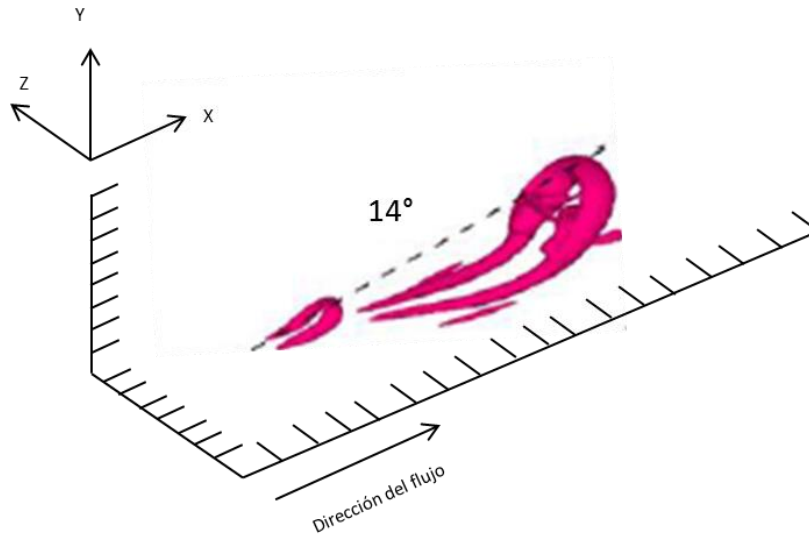


Ilustración 5-19. Esfuerzos normales generados a partir del esfuerzo cortante. Fuente: (Autor).

Al mismo tiempo que se da una oposición al estiramiento de los vórtices, ocurre el segundo efecto de los agentes reductores poliméricos.

#### 5.4.1.2. *Atenuación de los movimientos oscilatorios de turbulencia*

A medida que se elongan y desarrollan los vórtices padres como consecuencia del flujo elongado, se empieza a desarrollar una pequeña curvatura que le permite al extremo final del vórtice aproximarse a la región turbulenta con cierto ángulo (Ilustración 5-20). Como se definió en el Numeral 5.3.2, los vórtices crean zonas de bajas velocidades en dirección perpendicular al flujo en las zonas próximas a la pared de la tubería y zonas de altas velocidades (velocidades de hasta la mitad de la velocidad media del flujo) en la misma dirección, en las zonas próximas a la región turbulenta. Es en estas zonas de altas velocidades donde se producen movimientos oscilatorios que culminan con eyecciones hacia el centro de la tubería, permitiendo la disipación de energía (fenómeno de estallido o *Bursting*).



**Ilustración 5-20. Ángulo de aproximación del vórtice padre hacia la región turbulenta. Fuente: (Autor).**

El ángulo de aproximación a la región turbulenta está directamente relacionado con la fuerza de las eyecciones hacia la región turbulenta y en consecuencia, con la cantidad de energía disipada; entre mayor sea el ángulo de aproximación, más fuertes serán las eyecciones y mayores serán las pérdidas de energía en el sistema.

Al igual que una oposición al estiramiento de los vórtices padre, las cadenas poliméricas tienen como efecto la disminución del ángulo de aproximación a la región turbulenta, atenuando así los movimientos oscilatorios y la fuerza de las eyecciones.

Como se expresó anteriormente, el fenómeno de reducción de arrastre se debe a la combinación de los dos efectos explicados. Cabe resaltar que ambos efectos ocurren simultáneamente. Para entender mejor el fenómeno, se mostrará a continuación la investigación realizada por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Estatal de Arizona en el año 2008. La investigación trata de la modelación numérica de las estructuras de turbulencia, para diferentes casos de reducción de arrastre (Bohórquez, 2012).

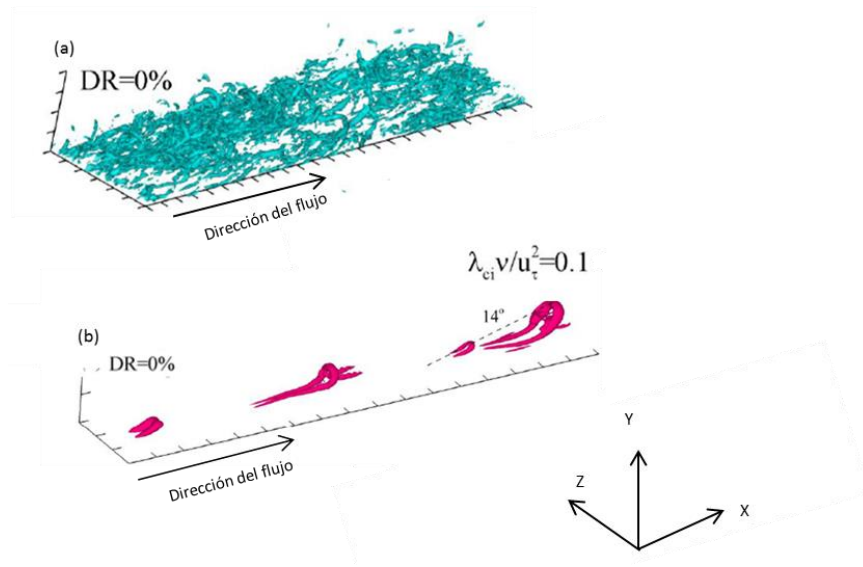


Ilustración 5-21. Reducción de arrastre en agentes poliméricos. Escenario DR=0%. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).

La investigación analiza, inicialmente, un escenario de cero reducción de arrastre (DR=0%). En dicho escenario se aprecia claramente la existencia de gran cantidad de vórtices padre que generan el fenómeno turbulento (Ilustración 5-21 (a)). De igual forma se observa que los vórtices padre tienen un ángulo de aproximación a la zona turbulenta de alrededor de 14° (Ilustración 5-21 (b)), lo que significa que se están generando eyecciones de gran magnitud, permitiendo altas disipaciones de energía. La ecuación en la Ilustración 5-21 (b) equivale a la magnitud de la fuerza de las eyecciones en el sistema.

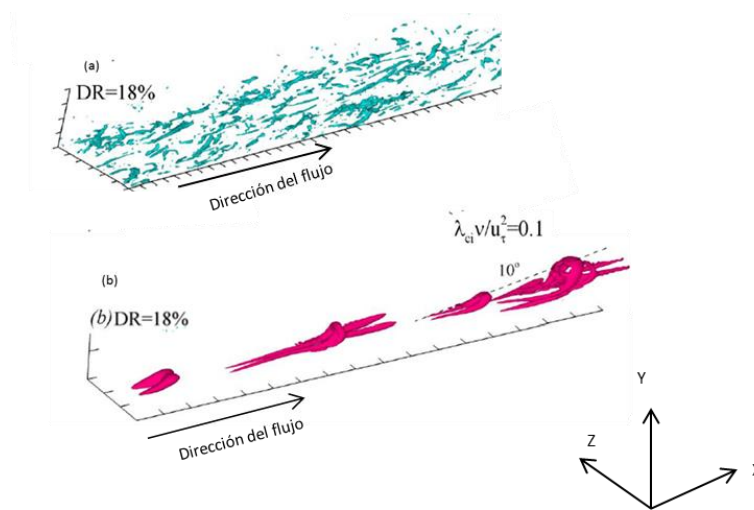
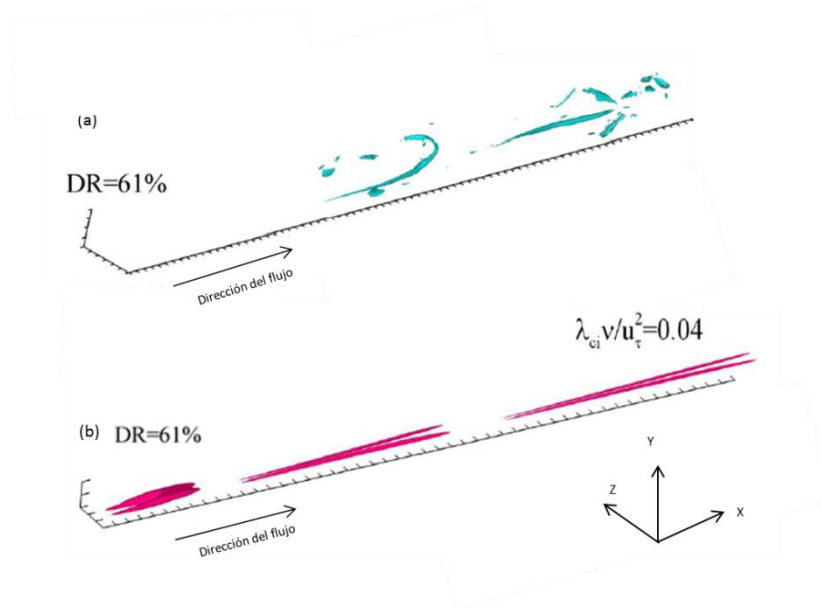


Ilustración 5-22. Reducción de arrastre en agentes poliméricos. Escenario DR=18%. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).

Para un escenario de DR=18%, se observa como los vórtices padre se han ido atenuando a consecuencia de la oposición al flujo elongado, debido a las cadenas poliméricas. Aunque el ángulo de aproximación a la región turbulenta ha disminuido por el efecto de los polímeros, la fuerza de las eyecciones permanece igual, y aún se registran grandes cantidades de energía disipada.



**Ilustración 5-23. Reducción de arrastre en agentes poliméricos. Escenario DR=61%. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).**

Posteriormente, en un escenario de DR=61%, se ve claramente la reducción de arrastre a consecuencia de los dos efectos mostrados. Se observa como los vórtices padre e hijo han sido atenuados a consecuencia de los polímeros, y como el ángulo de aproximación ha sido totalmente disminuido hasta el mínimo valor ( $0^\circ$ ), disminuyendo la fuerza en las eyecciones ( $\lambda_{ci} * \frac{v}{u_{\tau}^2} = 0.04$ ).

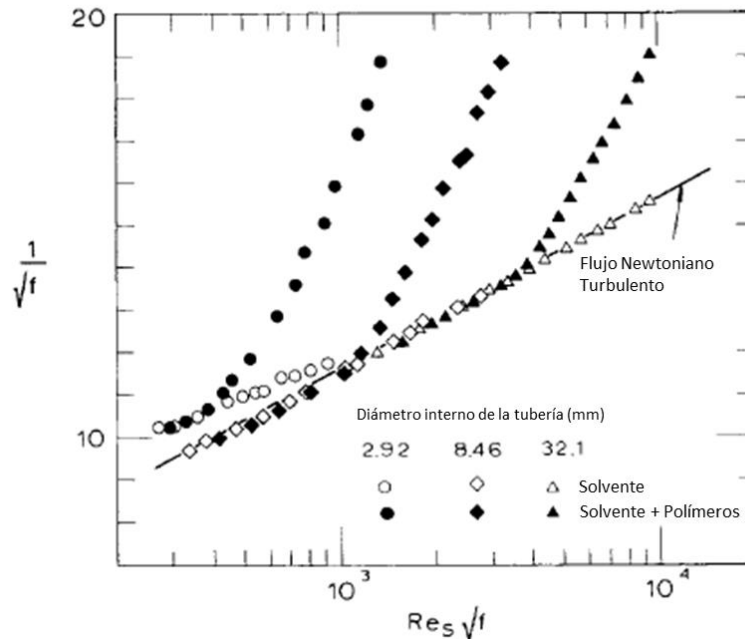
Para esta instancia, el perfil de velocidades ha adquirido una forma más laminar, la subcapa laminar viscosa se ha extendido hacia la región logarítmica y en consecuencia, la región logarítmica ha disminuido.

Más allá del mecanismo mediante el cual los agentes reductores poliméricos logran disminuir las pérdidas por fricción, existen diferentes variables que intervienen de una u otra forma en el desempeño de este tipo de agentes. Como se había dicho, variables como la concentración y el número de Reynolds afectan directamente el grado de reducción de arrastre obtenido.

Bien se sabe que para que se activen los agentes poliméricos, es necesario un cortante de activación, el cual está asociado con un número de Reynolds. Por ende se podría afirmar que para cada tipo de polímero existe un Re a partir del cual son efectivos. La anterior afirmación no es del todo cierta, pues como se ha visto en muchos ensayos experimentales, el Re a partir del cual son

efectivos los agentes poliméricos varía con el diámetro de la tubería a través de la cual son bombeados.

Virk, en sus estudios, con el fin de entender la hidráulica del flujo bajo la inyección de agentes poliméricos, evaluó el fenómeno de reducción de arrastre para diferentes diámetros (desde 2.92mm, hasta 32.1mm), obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 5-28. Efecto del diámetro en el fenómeno de reducción de arrastre de Agentes Poliméricos. Adaptada de: (VIRK, 1975).

En los resultados obtenidos por Virk se observa cómo el fenómeno de reducción de arrastre se inicia a diferentes números de Reynolds, dependiendo del diámetro interno de la tubería. Sin embargo, se guarda cierta tendencia en la cual para mayores diámetros es necesario un Re mayor para activar los agentes poliméricos. Es necesario aclarar que en sus experimentos, Virk utilizó un sólo agente polimérico, con un único cortante de activación ( $7 \text{ N/m}^2$ ). Sin embargo, por el efecto del diámetro, este cortante de activación se alcanza para diferentes Re.

Para entender el efecto del diámetro sobre la activación de los agentes poliméricos, es necesario entender primero la manera como varían las pérdidas por fricción en flujo tras la inyección de dichos agentes.

Existen dos regímenes de flujo en un contexto de reducción de arrastre: Régimen polimérico y Régimen de máxima reducción de arrastre.



En el régimen polimérico, el factor de fricción se ve afectado por las características naturales del polímero inyectado, bajo la siguiente relación planteada por Virk:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = (4 + \delta) * \text{Log}(Re\sqrt{f}) - 0.4 - \delta * \text{Log}(\sqrt{2} * d * W^*) \quad \text{Ecuación 5-37. Régimen polimérico.}$$

El Régimen de máxima reducción de arrastre es la máxima reducción posible; sin este régimen sería posible aumentar la concentración aumentando la reducción infinitamente. Este régimen se alcanza siempre, sin importar el diámetro utilizado o el tipo de polímero inyectado. También se le conoce como la asíntota de máxima reducción y está dada por la siguiente ecuación planteada por Virk:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 19 * \text{Log}(Re * \sqrt{f}) - 32.5 \quad \text{Ecuación 5-38. Asíntota de máxima reducción de Virk.}$$

La explicación detallada de los regímenes de reducción de arrastre se sale del alcance de este proyecto; sin embargo puede hallarse en la referencia (Bohórquez, 2012).

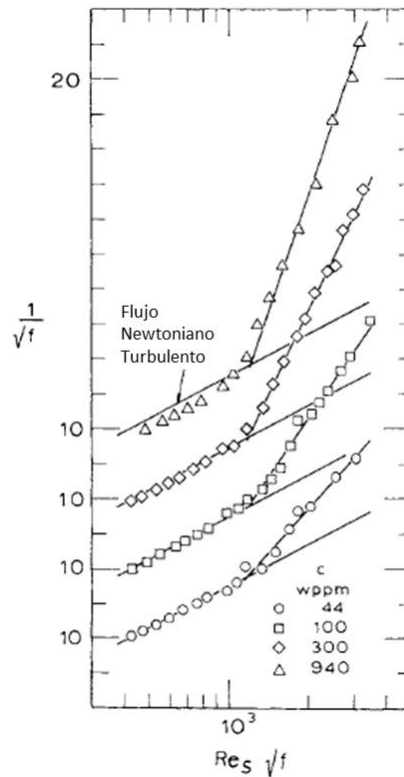
En el régimen polimérico es clara la relación directa entre el diámetro ( $d$ ),  $Re$  y el factor de fricción ( $f$ ). Entre mayor sea el diámetro, mayor es el coeficiente de fricción manteniendo constante  $Re$ , por lo cual al pasar de una tubería de menor diámetro, a una de mayor diámetro es necesario aumentar  $Re$ , con el fin de disminuir el coeficiente de fricción hasta obtener el cortante de activación bajo la siguiente relación:

$$f = \frac{8 * \tau_0}{\rho * v^2} \quad \text{Ecuación 5-39. Coeficiente de fricción.}$$

donde  $\tau_0$  es el cortante en la pared de la tubería (cortante de activación) y  $v$  es la velocidad del flujo.

Por esta razón, entre mayor sea el diámetro, mayores  $Re$  serán necesarios para disminuir el coeficiente de fricción hasta obtener el cortante de activación a partir del cual, por efecto de los agentes poliméricos, se atenúan las pérdidas por fricción (se disminuye aún más el coeficiente de fricción).

Por otra parte, la concentración juega un papel muy importante en el fenómeno de reducción de arrastre, ya que es la variable que estimula la variación de la pendiente del fenómeno de reducción de arrastre; entre mayor sea la concentración, mayor es la pendiente del fenómeno de reducción de arrastre, es decir, menores valores de fricción se alcanzarán para un mismo  $Re$  (Gráfica 5-29).



Gráfica 5-29. Efecto de la concentración en la reducción de arrastre. Adaptada de: (VIRK, 1975).

Claramente, en la gráfica anterior se observa el efecto de la concentración; sin embargo, como se dijo anteriormente, este efecto se ve limitado por la asíntota de máxima reducción, por lo cual el aumento en la concentración se hace efectivo hasta cierto punto. También es posible apreciar cómo, para diferentes concentraciones, la activación ocurre en un mismo  $Re$  (diámetro constante), lo que ratifica que el cortante de activación es una característica únicamente dependiente del tipo de polímero utilizado.

Hasta el momento se ha realizado un recorrido sobre los diferentes Agentes Reductores, enfatizando sobre los mecanismos que permiten la disminución en las pérdidas por fricción, sus usos en la industria y las variables que determinan su desempeño al ser sometidos a flujos presurizados. Sin embargo, dado que uno de los principales objetivos es relacionar el uso de agentes reductores con la industria petrolera colombiana, a continuación se llevará a cabo un análisis sobre la posible aplicación de dichos agentes bajo este enfoque, profundizando en las ventajas, desventajas y la viabilidad técnica y económica de cada grupo de Agentes Reductores en comparación con sus semejantes.



## 6. Viabilidad de los Agentes Reductores en la industria petrolera colombiana

En Colombia anualmente se transportan alrededor de 458 Kbpd (cifra correspondiente al transporte realizado para el año 2010), de los cuales 266 Kbpd que corresponden al 58%, son transportados por el Oleoducto Central de Colombia S.A (OCENSA, principal oleoducto colombiano), operado por la multinacional colombiana Ecopetrol. Este oleoducto cuenta con 7 estaciones de bombeo y almacenamiento que permiten enviar el crudo a través de una longitud aproximada de 830 Km, conectando el piedemonte llanero, principal fuente de explotación de recursos petroleros (ver Sección 3.3), con el principal puerto de exportación marítima de crudo ubicado en Coveñas. No obstante, a lo largo del recorrido, el oleoducto se ve enfrentado a diferentes solicitudes medioambientales y climáticas debidas a las diferencias topográficas que plantea el terreno por el que atraviesa. Dichas solicitudes influyen directamente sobre el comportamiento de los Agentes Reductores inyectados.

Para entender mejor la manera cómo influyen las solicitudes climáticas y medio ambientales sobre el oleoducto central de Colombia, se analizará la ubicación geográfica de los diferentes tramos que comprenden dicho oleoducto, esto con el fin de evaluar las condiciones del entorno en el cual se encuentran y las afecciones del mismo sobre el transporte. Para entender el siguiente análisis, se presenta la Ilustración 6-1, donde se puede apreciar el Oleoducto Central de Colombia y los oleoductos secundarios que concurren en él.

El inicio del Oleoducto Central de Colombia se encuentra en el piedemonte llanero, exactamente en la estación de bombeo Cusiana, ubicada en el departamento del Casanare, a una altitud de 402 msnm. Esta es una zona húmeda donde la temperatura promedio es de 27°C, sin embargo puede llegar a los 30° en temporada seca.

El crudo es bombeado hasta la estación El Porvenir a 33 Km, ubicado en el mismo departamento, a una altitud de 1113 msnm. Esta estación se encuentra en el inicio de la cordillera oriental, en lo que se considera como zona andina, para la cual las temperaturas pueden llegar a los 22°C.

Posteriormente, el crudo se envía hasta la estación Miraflores ubicada en el Km 86. Esta estación se encuentra en el departamento de Boyacá, zona andina de la cordillera oriental, a una altura de 1751 msnm., donde la temperatura promedio es de 18°C, sin embargo puede llegar a 15°C.

Desde la estación El Porvenir se bombea el crudo hasta la estación La Belleza ubicada en el departamento de Santander, a 223 Km de la estación Cusiana. A una altitud 1975 msnm, la estación El Porvenir puede alcanzar temperaturas de hasta 15°C. No obstante para llegar a esta estación, el oleoducto debió cruzar la cordillera oriental, alcanzando altitudes de hasta 2500 msnm, las cuales pueden llegar a temperaturas de hasta 9°C.

Posteriormente, el crudo se bombea hasta la estación Vasconia (Boyacá, 134msnm), de allí a la estación Caucaasia (Antioquia, 57 msnm) y finalmente a Coveñas (Sucre, 13 msnm). Se presenta el análisis detallado de la estación Coveñas, considerado como el escenario más crítico entre las tres estaciones, dadas sus similitudes en altitud. La última estación es el escenario donde se registran las mayores temperaturas posibles, las cuales pueden alcanzar los 38°C.



**Ilustración 6-1. Red de oleoductos de Colombia. Fuente: (OCENSA).**

Entendidos los diferentes escenarios sobre los cuales atraviesa el Oleoducto Central de Colombia, es posible afirmar que el transporte de crudo se verá afectado por un amplio rango de temperaturas (9°C- 38°C). Claramente, la temperatura es una variable importante en el desempeño de los Agentes Reductores de Arrastre, por lo cual debe tenerse en cuenta para el análisis de la industria petrolera colombiana.

Habiendo comprendido la magnitud del transporte a través de los oleoductos en Colombia, y las diferentes solicitudes que presenta este tipo de transporte, es posible establecer las ventajas y desventajas de los diferentes Agentes Reductores de Arrastre.

### 6.1. Ventajas de los Agentes Reductores de Arrastre

Se puede afirmar, que los Agentes Reductores de rastre como conjunto de metodologías, tienen la capacidad de permitir el bombeo de un caudal mayor disminuyendo la potencia necesaria; en otras palabras, tienen la capacidad de aumentar la eficiencia en el transporte de crudo para tuberías presurizadas. La disminución en la potencia permite que el oleoducto utilice menores



presiones para el transporte, lo que disminuye el riesgo de fugas y deterioro de las paredes internas, prolongando la vida útil del mismo.

Por otra parte, se sabe que el número de estaciones de bombeo en un oleoducto se debe a la necesidad de garantizar la presión de llegada del crudo. Dado que la presión en una tubería se ve afectada por las pérdidas por fricción, es necesario incluir estaciones de bombeo cada cierta distancia, con el fin de garantizar que las pérdidas por fricción para los tramos comprendidos entre estaciones, no sean suficientemente altas como para comprometer la presión de llegada del crudo. La inyección de Agentes Reductores de Arrastre al sistema, permite atenuar las pérdidas por fricción. Al existir menores pérdidas de presión en la tubería, es posible alargar la distancia correspondiente a los tramos entre estaciones de bombeo, lo que podría significar que se necesite un menor número de estaciones para el transporte entre origen - destino. De igual forma, es posible que las pérdidas por fricción se disminuyan lo suficiente como para considerar la implementación de oleoductos de menor diámetro y espesor para transportar un mismo caudal. De esta manera se podrían lograr grandes ahorros monetarios en infraestructura y dispositivos de bombeo.

Además de estas ventajas generales, la implementación de cada tipo de agente reductor, tendría ciertos puntos positivos a destacar.

### **6.1.1. Ventajas de la implementación de Surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre**

La principal ventaja del uso de Surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre, se debe su capacidad regenerativa después de ser sometidos a esfuerzos cortantes. Como se planteó en el Numeral 5.2, una vez las redes de micelas compuestas por surfactantes son sometidas a esfuerzos cortantes en la región cerca a la pared de la tubería, sufren cierta elongación que les permite almacenar dicho cortante; posteriormente liberan su energía mediante un proceso de relajación en el cual las micelas se separan de las redes y recuperan su estado inicial (estado no elongado). En su estado inicial tienen la capacidad de volver a formar redes de micelas y repetir el proceso. Este mecanismo permite que la reducción de arrastre sea un fenómeno constante que solo culmine cuando las redes son sometidas a esfuerzos muy altos que causen su total destrucción.

Esta cualidad regenerativa es una ventaja, ya que a diferencia de los otros tipos de agentes reductores, los Surfactantes no deben ser inyectados en cada estación de bombeo, pues nunca se deterioran. Además, el eventual paso a través de las bombas no es un problema, a diferencia de los polímeros, en los cuales ocurre un daño total.

Teniendo en cuenta que el oleoducto de mayor transporte en Colombia cuenta con 7 estaciones de bombeo, esta ventaja sería de gran importancia ya que no se necesitarían sistemas de inyección de agentes en cada estación, simplemente se realizaría la inyección en la estación de bombeo inicial. De esta manera se lograrían reducir muchos costos en cuanto a infraestructura, sistemas de inyección y costos de los agentes reductores como tal.

### **6.1.2. Ventajas de la implementación de Suspensiones de Fibras como Agentes Reductores de Arrastre**

Existen 3 ventajas principales en el uso de esta metodología. Partiendo de que las fibras son materiales naturales o sintéticos suspendidos generalmente en agua, y que la implementación de este método requiere concentraciones bajas (0-8%), se tendría la primera ventaja, la cual hace referencia al bajo costo de implementación. A diferencia de los Polímeros y los Surfactantes, las Suspensiones de Fibras, se realizan a partir de materiales que pueden ser fabricados fácilmente, y para los cuales no existe un mercado monopolizado; por el contrario, su manufactura se debe a un mercado bastante avanzado donde existe gran cantidad de competidores que permiten que se manejen precios muy bajos, como lo es el mercado de los textiles.

Las fibras, al ser materiales naturales o sintéticos, tienen la ventaja de ser insensibles a perturbaciones químicas y cambios en la temperatura. Esto hace posible que las suspensiones de fibras puedan ser utilizadas en cualquier tipo de crudo sin importar su composición química, y se puedan combinar con otros métodos como el precalentamiento del crudo, ya que las altas temperaturas no tienen ningún tipo de repercusión en su comportamiento.

Otra ventaja radica en que las suspensiones de fibras se pueden crear a partir de cualquier tipo de fibra, siempre y cuando la relación de aspecto y la concentración sean las adecuadas. No es necesario verificar si existe compatibilidad entre el crudo y la suspensión, ya que son materiales que no modifican las propiedades del crudo. Además, la inyección de las suspensiones no altera la calidad de los productos derivados.

Esta última ventaja es muy importante en el marco de la industria petrolera colombiana, ya que los principales pozos de extracción se encuentran ubicados en una zona (Llanos Orientales) donde predominan los cultivos de arroz y algodón, por lo cual se podrían utilizar fibras naturales como la cascarilla de arroz y las fibras de algodón para crear suspensiones. Se debe aclarar que las Suspensiones de Fibras solo se han probado en el ámbito teórico; por lo tanto fibras naturales como las que se acaban de nombrar nunca han sido utilizadas.

### **6.1.3. Ventajas de la implementación de Polímeros como Agentes Reductores de Arrastre**

La implementación de este método tiene dos ventajas muy importantes que podrían destacarlo sobre los otros tipos. La primera radica en que las cadenas poliméricas implementadas, generalmente están compuestas de moléculas de carbono e hidrógeno en un solvente que comúnmente en la industria es un hidrocarburo. Esta composición química permite que la inyección de polímeros al crudo transportado, no afecte la calidad de los productos derivados en su posterior refinamiento. Inclusive, esto significa que al final del transporte, no es necesario un proceso de separación de los polímeros, y por ende se evitan costos extras asociados con dicho proceso. Esto permitiría una mayor rentabilidad en las exportaciones de crudo para la industria petrolera colombiana.



Por otra parte, y es esta la gran ventaja para la aplicabilidad de este tipo de agentes en la industria petrolera colombiana, las cadenas poliméricas al ser inyectadas, además de producir cierta reducción de arrastre, actúan como aislantes térmicos. Se sabe con certeza que la temperatura del crudo se ve afectada por la tasa de transferencia de calor entre la tubería y el crudo como tal. De igual forma, la temperatura de la tubería se ve afectada por la tasa de transferencia de calor entre el ambiente externo y la tubería como tal. En este orden de ideas se afirma que la temperatura del crudo se ve afectada directamente por el ambiente exterior a la tubería que lo transporta. Esto es lo que hace imposible mantener la temperatura del crudo constante a lo largo del oleoducto, más aún cuando el oleoducto se encuentra en un país como Colombia, donde el rango de variabilidad de la temperatura ambiente es bastante amplio (9°C-38°C). Sin embargo, la ventaja de los agentes poliméricos es que al ser inyectados al sistema, la tasa de transferencia de calor entre la tubería y el crudo disminuye notablemente, pues actúan como una barrera entre ambas fronteras. Esto impide que la temperatura ambiente afecte la temperatura del crudo de una manera tan directa.

En el Numeral 4.1 se habló del precalentamiento del crudo como una posible solución al transporte de crudos pesados; sin embargo, esta solución debía ser acompañada de otro método ya que por sí sola no sería efectiva. Conociendo las ventajas de los agentes Poliméricos, es posible pensar en la combinación de ambas metodologías como una solución para incrementar la reducción en el arrastre, pues bajo la inyección de polímeros, además de atenuarse las estructuras turbulentas, el crudo perdería menos calor a lo largo del recorrido, al mismo tiempo que gracias al precalentamiento se bombearía un crudo con una viscosidad muy baja. Esta solución podría emplearse para el bombeo de crudos pesados, ya que una de las mayores problemáticas reside en sus altas viscosidades.

## **6.2. Desventajas de los Agentes Reductores de Arrastre**

Las desventajas en los Agentes Reductores de Arrastre son muy puntuales, por lo cual deben evaluarse específicamente para cada tipo de agente.

### **6.2.1. Desventajas de la implementación de Surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre**

La gran desventaja de los Surfactantes es la compatibilidad que debe existir entre este tipo de sustancias y el crudo a transportar. Las moléculas de surfactante tienen cierta polaridad química que debe ser estudiada en relación con las diferentes moléculas de hidrocarburo que hacen parte del crudo, esto con el fin de garantizar las fuerzas repulsivas suficientes para dar origen a la formación de micelas. Además de esto, este tipo de sustancias de no ser compatibles con el crudo, pueden formar sales insolubles, jabones y precipitaciones que afectarían el flujo.

Otra desventaja de los Surfactantes está dada por el rango limitado de temperaturas para los cuales son eficientes. Esto se debe a que las micelas (estructuras que permiten la reducción de arrastre) son muy susceptibles a cambios en la energía del sistema. Como se vio en el Numeral 5.2.5, las micelas cilíndricas (únicas capaces de crear el fenómeno de reducción de arrastre) son

formadas gracias al reordenamiento de los surfactantes, que inicialmente se encontraban en una forma elipsoidal. Este cambio de una estructura elipsoidal a una estructura cilíndrica se debe al aumento de la energía en el sistema, la cual genera un incremento en las fuerzas repulsivas que obligan a los surfactantes a ordenarse en otro tipo de estructura para mantener un equilibrio. Las moléculas de surfactante son muy sensibles a estos cambios, por ende un aumento en la temperatura se traduce en un aumento en la energía térmica y consecuentemente en la energía del sistema; esto finalmente obligaría a las micelas a reorganizarse en estructuras incapaces de generar reducción de arrastre. Es por esta razón que los Surfactantes no son eficientes en amplios rangos de temperatura.

Con base en esto es posible afirmar que en un oleoducto como el de OCENSA, es necesario analizar la viabilidad de los surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre, pues como se analizó, este oleoducto atraviesa lugares con diferentes condiciones climáticas, lo que implica un amplio rango de temperaturas (9-38°C). Entonces es posible que los Surfactantes sean efectivos para ciertos tramos, mas no para todo la longitud del oleoducto.

La última desventaja se debe a la necesidad de implementar un proceso de separación al final del transporte. Los Surfactantes son moléculas que podrían alterar la calidad del crudo y sus derivados, por lo cual deben ser separadas del crudo antes de su refinación. Los procesos de separación implican inversiones extras que aumentarían los costos de la implementación de este tipo de agentes.

### **6.2.2. Desventajas de la implementación de Suspensiones de Fibras como Agentes Reductores de Arrastre**

Al ser las suspensiones de fibras compuestas por materiales sintéticos o naturales ajenos al crudo, es posible que por el efecto de estos elementos se altere la calidad del crudo y sus derivados, lo que lleva a la primera desventaja. Al igual que en los Surfactantes, en las Suspensiones de Fibras es necesario un proceso de separación al finalizar el transporte, que permita extraer las fibras del crudo sin alterar la calidad del mismo. La implementación de este tipo de procesos, implica inversiones extras en infraestructura y personal, lo que aumentaría los costos de operación.

Por otra parte, partiendo de que el oleoducto está conformado por gran cantidad de tuberías interconectadas entre sí, es posible que por efecto de la constante rotación de las fibras a consecuencia del flujo, se generen incrustaciones repentinas de fibras en las conexiones del oleoducto. La repetición de este evento podría generar atascamiento en la tubería comprometiendo el transporte de crudo. De ocurrir esto, debería aumentarse la presión de bombeo para romper dichos atascamientos, lo que significaría un aumento en la energía necesaria, efecto opuesto al concebido bajo el concepto de agente reductor.

La última desventaja de las Suspensiones de Fibras es consecuencia de la capacidad rotativa planteada en el párrafo anterior. Se conoce que el fenómeno de reducción de arrastre por efecto de las Suspensiones de Fibras, se debe a la capacidad de alineación de los flóculos o fibras



individualmente en dirección del flujo. Dicha alineación permite obstrucción total de los vórtices padre, o la atenuación de los mismos por el efecto de la viscosidad rotacional (ver página 65). Sin embargo, la capacidad rotacional de las fibras hace difícil su predicción, por lo cual no es posible anticipar la magnitud de reducción de arrastre que podría obtenerse para cierta concentración de fibras.

Gran cantidad de modelos computacionales, basados en el análisis del comportamiento de las fibras en el flujo, se han realizado con el fin de establecer patrones de movimiento que permitan predecir acertadamente las magnitudes de reducción de arrastre con base en la concentración empleada. Sin embargo, dado que existen muchas variables que podrían alterar el movimiento de las fibras, estos modelos no han tenido un éxito total. Por esta razón, las predicciones se generan a través de modelos experimentales y se extrapolan a modelos a escala real.

### **6.2.3. Desventajas de la implementación de Polímeros como Agentes Reductores de Arrastre**

Al igual que en los surfactantes, la principal desventaja del uso de polímeros se debe a la compatibilidad que debe existir entre este tipo de sustancias, el solvente empleado y el tipo de crudo a manejar. Como se estudió en el Numeral 5.4, la acción de un polímero solo es efectiva si éste se encuentra disuelto en un solvente específico. Sin embargo, no todos los polímeros son solubles en un mismo solvente; existen polímeros solubles en soluciones acuosas y en soluciones de hidrocarburos. No obstante, aunque exista compatibilidad entre el polímero y solvente, solo se podrá garantizar un fenómeno de reducción de arrastre siempre y cuando estas sustancias sean compatibles con el crudo a transportar. Por todas estas razones, con miras a generar una disminución en las pérdidas por fricción, es necesario estudiar detalladamente la compatibilidad entre estos tres conceptos.

Otra desventaja de los agentes poliméricos se encuentra en la degradación que sufren al ser sometidos a esfuerzos cortantes. Dicha degradación es consecuencia del rompimiento de la estructura lineal del polímero, hasta el punto en que sus componentes monómeros se encuentran libres y desligados unos de otros, lo que vuelve imposible un fenómeno de reducción de arrastre.

Aunque la degradación ocurre en todos los tipos de polímeros, esta se ve acelerada por un incremento en el peso molecular de los monómeros y la temperatura de la solución. Lo que crea cierta controversia, ya que por una parte, un incremento en el peso molecular incrementa la magnitud de la reducción de arrastre y aumenta el cortante de activación, lo que permite que los polímeros sean efectivos a menores números de Reynolds. De igual forma, la temperatura al aumentarse disminuye la viscosidad del crudo permitiendo su fácil bombeo. En este orden de ideas, el efecto del peso molecular, temperatura y degradación, debe analizarse como un conjunto de eventos, con el fin de hallar un equilibrio.

La degradación polimérica no solo ocurre por efectos del cortante en la pared de la tubería, sino también por el paso de los polímeros a través de las bombas impulsadoras, lo que hace necesaria



la inyección de polímeros en cada estación de bombeo. Teniendo en cuenta que en el Oleoducto Central de Colombia existen 7 estaciones de bombeo, la degradación es un evento a tener en cuenta, pues al necesitarse 7 sistemas de inyección de polímeros (uno para cada estación) los costos de inversión en infraestructura pueden elevarse bastante.

Por último, existe una desventaja asociada con los costos de obtención de los agentes poliméricos. Esto se debe a que en el mercado existen pocas empresas, protegidas por numerosas patentes, capaces de producir este tipo de agentes, lo que les permite fijar precios extremadamente altos para su comercialización. Esto hace que empresas transportadoras como OCENSA (empresa que actualmente utiliza este método) se vean en la necesidad de acogerse a estos precios, utilizando grandes cantidades de dinero para la ejecución de este método.

Hasta el momento se ha realizado un análisis sobre los aspectos positivos y negativos de los diferentes Agentes Reductores de Arrastre bajo el marco de la realidad colombiana. Con el fin de acentuar un poco más el tema, se cree necesario indagar sobre la manera como se podrían implementar este tipo de sustancias al Oleoducto Central de Colombia. Las secciones Viabilidad técnica y Viabilidad económica de los Agentes Reductores de Arrastre, se plantean con este fin.

### **6.3. Viabilidad técnica de los Agentes Reductores de Arrastre**

Para entender las necesidades en cuanto a infraestructura y aspectos operacionales que implica la inyección de agentes reductores, es necesario comprender de manera previa la función y forma de operación de las estaciones de bombeo, ya que es en estos puntos donde se realiza la inyección de sustancias.

Las estaciones de bombeo son puntos estratégicos ubicados a lo largo del oleoducto, construidos con el fin de elevar la presión de bombeo del crudo, la cual ha sido afectada por las pérdidas por fricción. Además de bombear el crudo, las estaciones de bombeo cumplen funciones de almacenamiento y control de operaciones. A continuación se presenta el esquema general de una estación de bombeo típica:

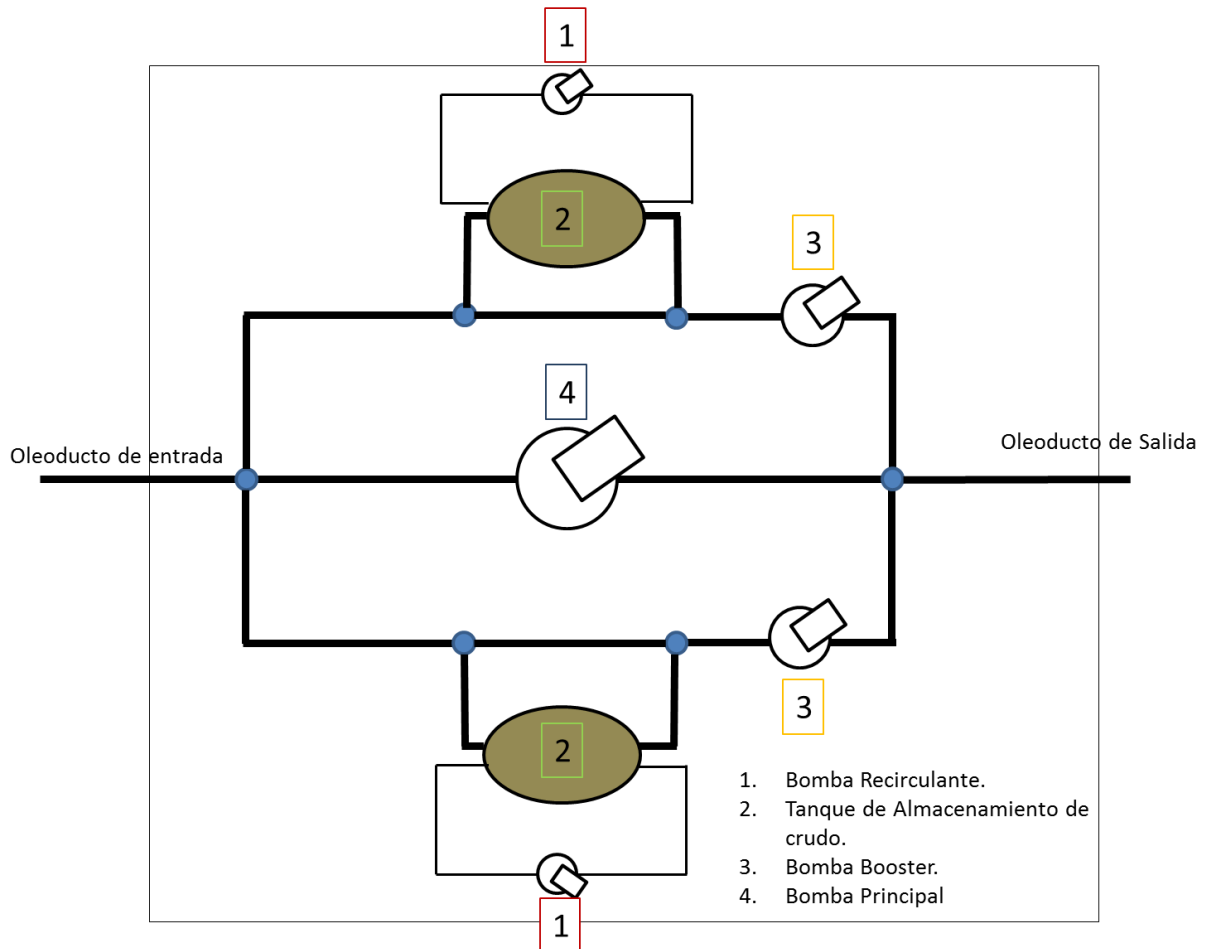


Ilustración 6-2. Esquema de una estación de bombeo típica. Fuente: (Autor).

En el esquema, el crudo llega a la estación de bombeo a través del oleoducto de entrada; si es necesario se envía a los tanque de almacenamiento, o de lo contrario se bombea a través de la Bomba Principal, la cual es la encargada de elevar la presión de bombeo del crudo (principal función de las estaciones de bombeo). Si el crudo es almacenado, es necesario implementar una Bomba Recirculante que permita mantener una temperatura constante. Para transportar el crudo almacenado en los tanques, se utiliza la Bomba Booster con el fin de bombear el crudo hasta el oleoducto principal.

La inyección de Agentes Reductores de Arrastre, es una acción que se ejecuta una vez el crudo se haya bombeado a través de la Bomba Principal. Esto con el fin de que se generen condiciones de flujo que permitan alcanzar el fenómeno de activación (*Onset Phenomenon*) de manera más rápida. La inyección de este tipo de sustancias hace necesaria la implementación de bombas inyectoras de alta potencia que permitan una mezcla total con el crudo. Para este fin se podría implementar una bomba inyectora fabricada por la compañía especializada en bombas para oleoductos HILLMANN S.A, cuya referencia es la Bomba Inyectora MP código BTG/HX (Ilustración

6-3). Esta referencia es capaz de manejar presiones de hasta 4000 KPa, y una temperatura de hasta 150°C, las especificaciones pueden ser consultadas en la referencia (HILLMANN, 2013).



**Ilustración 6-3. Bomba Inyectora MP BTG/HX HILLMAN. Adaptada de: (HILLMANN, 2013).**

Además de las bombas de inyección, es necesaria la construcción de tanques de almacenamiento de Agentes Reductores de Arrastre, ya que este tipo de sustancias deben estar aisladas en dispositivos sellados, con el fin de impedir cualquier modificación en su concentración o composición química (Surfactantes y Polímeros). Este tipo de tanques deben ser construidos según la regulación de la norma API 650, por lo general son tanques en forma de cigarrillo (Ilustración 6-4).



**Ilustración 6-4. Tanque sellado para la implementación de DRAs. Adaptada de: (Facultad de Ingeniería UBA, 2007).**

La infraestructura vista hasta el momento es necesaria para todos los tipos de Agentes Reductores de Arrastre. No obstante, para las Suspensiones de Fibras es necesaria la implementación de otros dispositivos considerados indispensables para la inyección.

Dado que las fibras son materiales que por lo general son obtenidos en longitudes mucho mayores a las necesarias, deben ser cortadas para su implementación en las suspensiones. Para el corte de las fibras se considera necesaria la adquisición de una máquina cortadora rotativa. La empresa española LIDEM, especializada en maquinaria de corte textil, produce una máquina denominada ROTATOR (Ilustración 6-5), capaz de cortar filamentos entre 1 y 300 mm, con una eficiencia de 10.000 Kg/h.



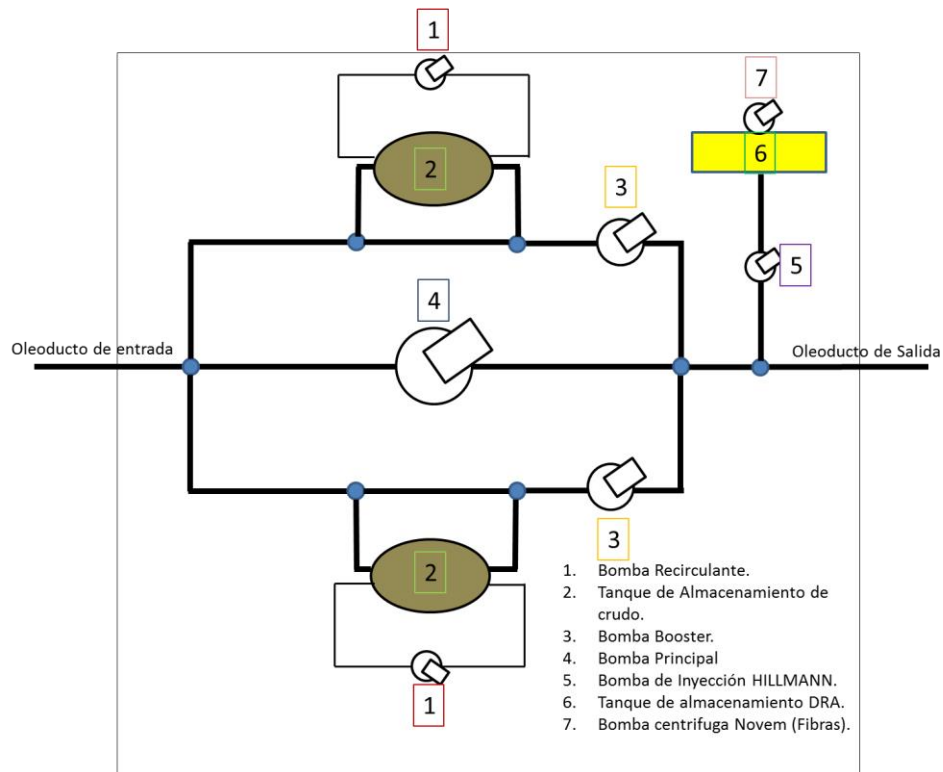
Ilustración 6-5. Máquina ROTATOR de Lidem. Adaptada de: (LIDEM, 2013).

Se debe tener en cuenta que una vez conformada y almacenada la Suspensión de Fibras, es indispensable implementar un mecanismo para impedir la sedimentación (situación que no ocurre con los Surfactantes y Polímeros), ya que las fibras no se disuelven en el solvente. En los montajes experimentales citados, se observó que la mayoría de los autores resolvían este problema a partir del uso de bombas centrífugas o rotodinámicas incorporadas a los tanques de almacenamiento. Se cree conveniente la implementación de una bomba centrífuga de 50 HP. La compañía Mexicana Novem Sistemas de Agua, produce un dispositivo cuya referencia es Bomba Centrífuga K4L 50HP 3450 RPM 5X4B (Ilustración 6-6) capaz de impedir la sedimentación de fibras. Las especificaciones del dispositivo pueden ser consultadas en la referencia (NOVEM, 2013).



**Ilustración 6-6. Bomba centrífuga K4L 50HP 3450 RPM 5X4B Novem. Adaptada de: (NOVEM, 2013).**

Una vez comprendida la infraestructura necesaria para la inyección de los Agentes Reductores, es posible realizar el esquema de una estación de bombeo típica en donde sea posible esta acción:



**Ilustración 6-7. Esquema de una estación de bombeo típica, con infraestructura para la aplicación de DRAs. Fuente: (Autor).**

Se ha realizado un análisis de viabilidad técnica en cuanto a la infraestructura necesaria para la aplicación de DRAs, sin embargo, es indispensable tener en cuenta la viabilidad operacional. Esta viabilidad se relaciona directamente con los costos que implica la implementación de DRAs, por lo tanto se analiza en el siguiente Numeral.



## 6.4. Viabilidad económica de los Agentes Reductores de Arrastre

Se realizará un análisis de costos de operación e infraestructura necesaria para cada tipo de agente reductor, enfocado al Oleoducto Central de Colombia, ya que este es el oleoducto que transporta el mayor volumen por año (266 Kbpd) de crudo en el territorio colombiano.

Como se sabe, existen numerosos tipos de sustancias que podrían ser aplicadas por cada tipo de agente reductor; por lo tanto el análisis se hará únicamente para una sustancia por cada tipo de agente reductor. El criterio de selección de la sustancia se basa en que a lo largo de la revisión bibliográfica hecha, se identificó dicha sustancia como la más eficiente y utilizada a nivel mundial en los montajes experimentales citados.

### 6.4.1. Viabilidad económica de los Surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre

De los montajes experimentales citados, se concluye que la solución de surfactante más usada está compuesta por el surfactante Dodecilsulfato Sódico (SDS) en un medio acuoso, con la presencia de moléculas de NaCl en función de contraión. Se encontró que la concentración crítica de formación de micelas (CMC) para este tipo de solución equivale a 376,4 mM (ver página 32), y la concentración crítica de formación de micelas cilíndricas es igual a 17CMC (ver página 33), es decir 6.399 mM. De igual forma, existe una relación de masa 1:1 entre el surfactante y el contraión, lo que indica que deberá agregarse el mismo peso para ambas sustancias en la solución.

La molaridad (M) es una medida de cantidad de soluto por unidad de volumen dada por la siguiente relación:

$$M = \frac{n}{V}$$

Ecuación 6-1. Molaridad

donde,

$n$  → Solute en moles

$V$  → Volumen en litros

$n$  está dado por la siguiente relación:

$$n = \frac{\text{masa soluto (gr)}}{\text{masa molar } \left(\frac{\text{gr}}{\text{mol}}\right)}$$

Ecuación 6-2. Moles de soluto



La masa molar del SDS es de 288,372 gr/mol. Esto permite calcular una cantidad de surfactante SDS de 1.847 gr/litro, equivalente a 6.992,15 gr/galón de solvente (agua pura). La misma cantidad es utilizada para el contraión NaCl.

El uso de surfactantes está destinado principalmente a sistemas de refrigeración o calefacción donde el fluido empleado es agua; sin embargo, algunos estudios, como el de la Universidad de Akron en Ohio (E.E.U.U), han experimentado la inyección de Surfactantes en algunos tipos de crudo. Las concentraciones de solución de Surfactantes utilizadas en los montajes experimentales varían entre los 20 y 45 ppm dependiendo del tipo de surfactante y crudo utilizado. No obstante, concentraciones mayores a 45 ppm no se han registrado hasta el momento.

En este orden de ideas y utilizando una concentración de solución de 45 ppm (el caso donde se registrarían los mayores costos), es posible cuantificar la cantidad necesaria de Surfactante y contraión para transportar el volumen de crudo anual registrado por OCENSA.

La cantidad de 266 Kbps (transportada por OCENSA) equivale a 11.18 millones de galones por día. En este contexto, una concentración de 45 ppm, equivaldría a la inyección de 503.1 galones de solución de Surfactante SDS por día. Si se considera que el Oleoducto Central de Colombia opera 360 días al año, serían necesarios entonces 181.116 galones de solución de Surfactante SDS por año. Este volumen anual equivale a aplicación de 1.266,39 toneladas de surfactante SDS, e igual cantidad para el contraión NaCl.

En Colombia no existen proveedores industriales de SDS capaces de suplir esta cantidad. Sin embargo, en países como China es posible conseguir este surfactante a un precio promedio de USD \$ 5.200 por tonelada. Esto significaría una inversión anual total de USD \$ 6'585.236,33.

A este valor debe sumarse el costo del contraión NaCl, que puede conseguirse en el mercado Chino por un total de USD \$ 1.780 por tonelada. Esto equivale a una inversión total anual de USD \$ 2'254.177,05.

Por último, debe sumarse el precio del solvente, para el cual se usa agua purificada. En Colombia este bien se vende por un precio alrededor de USD \$ 1,17 por metro cúbico (COP \$ 2.210) (máxima tarifa año 2013, (El Tiempo, 2013)). Dado que 181.116 galones equivalen a  $685.597 m^3$ , el costo total del solvente sería USD \$ 802.148.

El costo anual de implementación de la solución de surfactante SDS como Agente Reductor de Arrastre sería de USD \$ 9'641.561,38. Con el fin de hacer posible la comparación entre el costo de aplicación de los diferentes Agentes Reductores de Arrastre, se calcula el costo del agente reductor por barril de crudo, en los Surfactantes este costo sería de USD \$ 0.10.

Si se agregaran a los costos operativos, los costos correspondientes a la compra e instalación de bombas inyectoras y tanque de almacenamiento, se tendría que tener en cuenta USD \$ 100.000





para las estaciones de bombeo en las que sea necesario. Sabiendo que los Surfactantes tienen capacidad regenerativa, solo sería necesario tener en cuenta estos costos en las estaciones de Cusiana, por ser la estación inicial; El Porvenir y Vasconia, por ser estaciones donde concurren los oleoductos secundarios. Se calcula entonces un costo de inversión en infraestructura de USD \$ 300.000.

#### **6.4.1. Viabilidad económica de las Suspensiones de Fibras como Agentes Reductores de Arrastre**

Las Suspensiones de Fibras como Agentes Reductores de Arrastre jamás han sido probadas fuera del ámbito teórico, por lo cual no se tiene registro alguno de concentraciones de aplicación en oleoductos. Con el fin de establecer una comparación aproximada de costos, se utilizará una concentración de inyección igual a la estipulada para los Surfactantes en el numeral anterior, equivalente a 45 ppm.

A lo largo del proyecto, las fibras de Nylon Liso con una relación de aspecto de 51 ( $r=51$ ) suspendidas en un medio acuoso a una concentración de masa del 4 wt% (debe aclararse que esta concentración hace referencia a la concentración de las fibras en la suspensión y no de la suspensión en el crudo), han demostrado tener un grado de reducción de arrastre superior al 50%, siendo las más eficientes en los montajes experimentales citados (ver Tabla 5-3).

Sabiendo que la concentración de masa es el porcentaje del peso total de la suspensión que corresponde al peso de las fibras, y que la densidad del agua es  $1 \frac{Kg}{l}$ , es posible establecer el peso total de fibras por litro bajo la siguiente relación:

$$4\% = \frac{\text{Peso Fibras}}{\text{Peso Fibras} + 1}$$

$$\text{Peso Fibras} = 41.66 \text{ gr}$$

Esto permite calcular el peso de las fibras por galón de suspensión, es cual es igual a 157.69 gr/galón.

Como se vio en el numeral anterior, para transportar un volumen diario de 266 Kb, inyectando la Suspensión de Fibras a una concentración de 45 ppm, se necesitaría un volumen diario de 503.1 galones de dicha suspensión, es decir un volumen anual de 181.116 galones. Este volumen se traduce en la necesidad de implementar anualmente un total de 28.559,8 Kg de Fibras con el fin de mantener una concentración del 4 wt% por galón de suspensión.

Con el objetivo de cotizar el costo de las fibras de nylon, se contactó a la empresa fabricante de fibras sintéticas ENKA de Colombia S.A, ubicada en la ciudad de Medellín (principal ciudad



fabricante de textiles en Colombia). Se encontró que la fibra de nylon conocida como Deciltex 44 (44 gr por cada 10.000 m) manufacturada por esta compañía, se adaptaba muy bien a las necesidades de la suspensión, ya que el radio de la sección transversal del filamento era aproximadamente 0.035mm, lo que implica una longitud promedio de fibras de 1.78 mm con el fin de mantener  $r=51$ . Al comparar esta longitud con los experimentos recopilados por Kerekes en sus estudios, se comprobó que se encontraba dentro del rango de longitudes utilizadas (ver Tabla 5-3).

El costo por kilogramo de fibra cotizado fue de USD \$ 6.87, por lo tanto el costo total anual sería de USD \$ 196.206. No obstante, este tipo de fibra se vende enrollada en tubos metálicos, lo cual es un inconveniente para su aplicación en las tuberías. Es por esto que deben ser cortadas antes de usarse como agentes reductores. Para el corte de este tipo de fibras se podría adquirir la máquina ROTATOR especificada en el numeral anterior; el costo de este dispositivo es de USD \$ 35.640.

Al igual que en los Surfactantes, debe tenerse en cuenta el costo del volumen del medio acuoso sobre el cual están suspendidas las fibras. Este medio es agua purificada, por lo cual el costo que deberá tenerse en cuenta es de USD \$ 802.148.

Tras este análisis es posible fijar un precio aproximado de USD \$ 197.008 para la implementación anual de Suspensiones de Fibras como Agente Reductor de Arrastre en el oleoducto central de Colombia. El costo de aplicación de las Suspensiones de Fibras por barril de crudo sería de USD \$ 0.00205.

Si se quisiese analizar el costo de inversión incluyendo la maquinaria necesaria para la implementación, deberían incluirse los costos de la maquina ROTATOR, la bomba de inyección, tanque de almacenamiento y una bomba centrífuga o rotodinámica que evite la sedimentación de las fibras en el tanque. Esta última podría adquirirse por un costo de USD \$ 9.913 (precio para bomba centrífuga K4L de 50 HP, producida por la empresa mexicana NOVEM). El costo en infraestructura sería de USD \$ 145.553, para cada estación de bombeo en donde sea necesaria. Este tipo de infraestructura sería necesaria en la estación inicial de bombeo Cusiana y las estaciones de El Porvenir y Vasconia, por la razón explicada en el numeral anterior. El costo de inversión total para el oleoducto de OCENSA sería de USD \$ 436.659.

#### **6.4.2. Viabilidad económica de los Polímeros como Agentes Reductores de Arrastre**

La empresa Phillips Specialty Products Inc, perteneciente a la compañía petrolera estadounidense Conoco Phillips, es la empresa líder a nivel mundial en la producción y comercialización de sustancias Poliméricas capaces de generar reducción de arrastre. Entre sus productos se encuentran sustancias destinadas a la reducción de arrastre en sistemas que impliquen el transporte de agua no potable, crudos y productos refinados (Figura 6-1). Sin embargo, el fuerte de esta empresa es la producción de sustancias aplicables al transporte de crudos, entre las cuales se encuentran sus productos más populares, Liquid Power y Extreme Power.

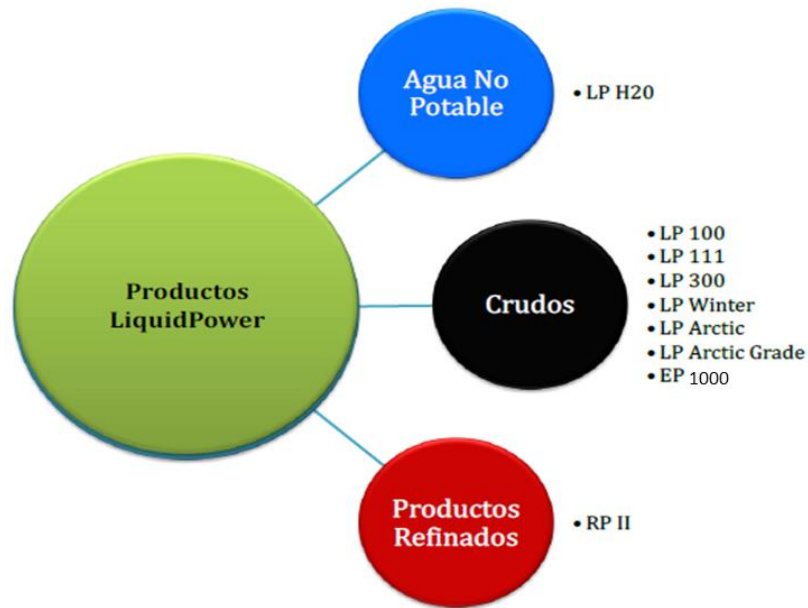
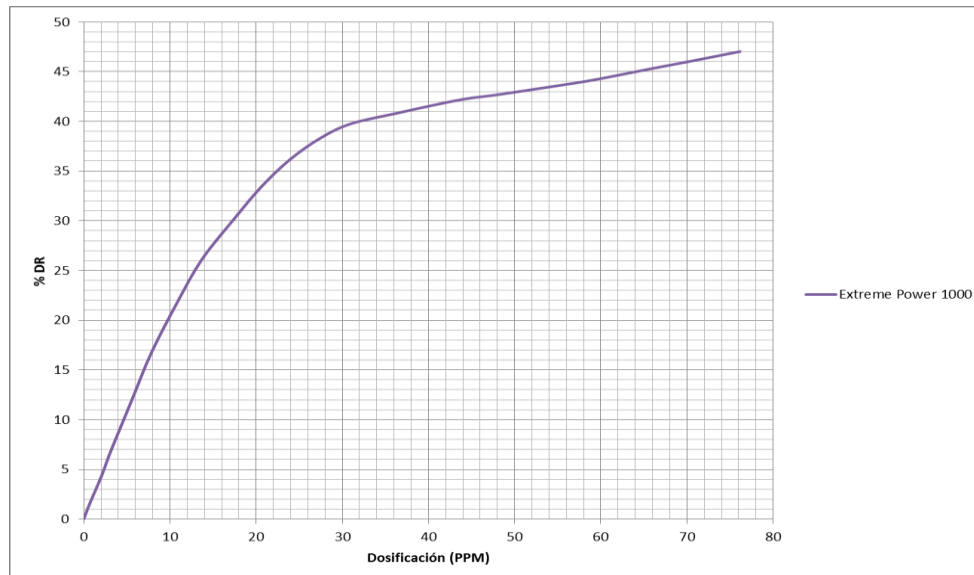


Figura 6-1. Productos producidos por Phillips Specialty Products Inc. Adaptada de: (Bohórquez, 2012).

Actualmente la compañía Conoco Phillips abastece al Oleoducto Central de Colombia S.A (OCENSA) con el producto Extreme Power destinado al transporte de crudos pesados. El desempeño reportado por OCENSA para la aplicación de esta sustancia se puede apreciar en la Gráfica 6-1.



Gráfica 6-1. Desempeño Extreme Power 1000. Adaptada de: (OCENSA, 2012).



En un escenario de máxima reducción de arrastre, la concentración requerida para el transporte de crudo sería de 75 ppm, lo que equivaldría a 838 galones de Extreme Power 1000 (EP 1000) por día; conociendo el volumen total transportado diariamente por OCENSA. El volumen de esta sustancia necesitado anualmente por OCENSA corresponde a 301.680 galones.

El precio de un galón del Agente Reductor de Arrastre EP 1000 se toma como USD \$ 30 (Bohórquez, 2012). Este precio permite calcular un costo anual en sustancias poliméricas de USD \$ 9'050.400. Sin embargo, considerando que los polímeros deben ser inyectados en cada estación de bombeo, debido a su degradación durante el transporte y paso a través de las bombas, es necesario multiplicar el costo anual por la cantidad de estaciones de bombeo. Considerando la aplicabilidad de los polímeros en 6 de las 7 estaciones de bombeo del Oleoducto Central de Colombia (en Coveñas no son necesarios), se obtendría un valor de USD \$ 54'302.400 destinado únicamente a la adquisición de este tipo de sustancias. El costo de aplicación de las sustancias poliméricas por barril de crudo sería de USD \$ 0.567.

Los costos en infraestructura para este tipo de agentes implican la compra e instalación de bombas inyectoras y tanque de almacenamiento, por lo cual se tendrían que tener en cuenta USD \$ 100.000 para las estaciones de bombeo en las que sea necesario. Estos dispositivos deberán ser tenidos en cuenta en 6 estaciones por el efecto de la degradación polimérica, por lo cual se tendrían que invertir USD \$ 600.000. Se debe resaltar que esta inversión no se realiza anualmente, ya que la vida útil de las bombas inyectoras oscila alrededor de 25 años.



## 7. Conclusiones y recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

La revisión bibliográfica y el análisis llevado a cabo sobre el estado del arte en el uso de Agentes Reductores de Arrastre para facilitar el bombeo de crudos pesados, permite concluir:

- Los constantes avances tecnológicos, científicos y económicos han permitido el mejoramiento en la calidad de vida y un incremento poblacional drástico. En consecuencia se ha incrementado la demanda energética mundial, lo que ha obligado a las empresas del sector a analizar fuentes posibles de explotación, como lo son los crudos pesados y extra pesados, considerados de baja rentabilidad, para dar solución al agotamiento de los recursos convencionales y a una posible crisis energética en un futuro próximo.
- Alrededor del 87% de las reservas totales existentes de crudo corresponden a crudos pesados y extra pesados. Sin embargo, la explotación de este tipo de crudos corresponde al 4.1% de la explotación mundial petrolera. Esto demuestra que esta práctica es una idea relativamente nueva que ha venido tomando fuerza en los últimos años, a consecuencia de nuevas metodologías de explotación y transporte, como lo es el uso de Agentes Reductores de Arrastre.
- Colombia es un país donde el 43,5% de los crudos explotados corresponde a crudos pesados y extra pesados. Además, el 77% de la explotación total de crudos es transportada hasta el puerto de Coveñas para su exportación. Esto permite afirmar que existe la necesidad de implementar metodologías como el uso de Agentes Reductores de Arrastre que permitan facilitar el transporte a través de los principales oleoductos de Colombia.
- Los métodos tradicionales usados de manera previa a la aparición de los Agentes Reductores de Arrastre, buscan facilitar el bombeo mediante la manipulación de la viscosidad del crudo a transportar. Este tipo de metodologías han tenido grandes inconvenientes en cuanto a la viabilidad técnica, ya que implican procesos de reducción de viscosidad capaces de generar inestabilidad en el crudo o que pueden ser alterados por gran cantidad de variables difíciles de controlar, lo que hace poco eficiente la aplicación de estos métodos.
- Existen cinco métodos tradicionales: el Pre calentamiento del crudo, que mediante un incremento en la temperatura disminuye la viscosidad; Dilución, disminuye la viscosidad mediante la mezcla de crudos más livianos; Refinamiento previo, busca incrementar la bombeabilidad mediante un proceso de refinación parcial *IN SITU*; Flujo anular, facilita el transporte mediante la implementación de una película de agua que rodea al crudo; y por último las Emulsiones, que buscan disminuir la viscosidad mediante la generación de gotas dispersivas de crudo en agua o viceversa.
- La turbulencia es un fenómeno disipativo de energía, originado a partir de la acción cíclica y consecuente de estructuras definidas, denominadas estructuras turbulentas. Las



principales estructuras son: *Vórtices, Streaks, Bursting y Sweeps*. Sin embargo, son los vórtices los que permiten el inicio del fenómeno.

- Los Agentes Reductores de Arrastre surgen como una alternativa a los métodos tradicionales, para facilitar el bombeo de crudos pesados. Sus orígenes se remontan a 1931, con los autores Forrest y Grierson. El mecanismo de todos los tipos de Agentes es diferente, pero el fin de atenuar las estructuras turbulentas mediante la oposición al estiramiento de los vórtices es común.
- Los Surfactantes son un tipo de Agente Reductor con capacidad regenerativa, que permite la disminución en las pérdidas por fricción a través de la formación de redes de micelas. Este tipo de estructuras, semejantes a la composición de un gel, evitan la elongación de los vórtices padres mediante su posicionamiento en la región cerca a la pared de la tubería y alineación en dirección del flujo. Estos eventos dan origen al fenómeno de Deslizamiento de Pared, el cual evita la elongación de la estructura turbulenta mencionada.
- Las Suspensiones de Fibras son un tipo de Agente Reductor que solo es capaz de atenuar el fenómeno turbulento en un estado homogéneo. El mecanismo de reducción de arrastre de basa en la formación de flóculos que permiten la oposición total o parcial a los movimientos radiales de los vórtices padre, impidiendo su elongación y las fluctuaciones de velocidad que se generan a partir de estos. Aunque se ha comprobado la eficiencia de este tipo agente, se descarta su aplicación en la industria petrolera, pues solo ha sido probado en el ámbito teórico.
- Las cadenas de Polímeros son el Agente Reductor más utilizado en la industria petrolera. Su popularidad se debe a los altos porcentajes de reducción de arrastre obtenidos bajo su aplicación. El fenómeno de reducción de arrastre se debe a la oposición de estas sustancias al flujo elongado, por efecto de una propiedad denominada viscosidad de elongación y a la disminución en el ángulo de aproximación de los vórtices padre hacia la región turbulenta.
- El efecto de los Agentes Reductores de Arrastre, además de atenuar el fenómeno turbulento, incide directamente sobre el perfil logarítmico de velocidades. En los tres tipos de Agentes investigados se obtuvo la laminarización del flujo y la atenuación de las fluctuaciones de velocidad perpendiculares al flujo.
- Para la aplicabilidad de las sustancias estudiadas como Agentes Reductores de Arrastre, es necesario evaluar previamente los costos operacionales y de infraestructura necesarios para la inyección, esto con el fin de garantizar la mayor efectividad al más bajo costo. El análisis de dichos costos llevado a cabo, permitió destacar a las suspensiones de fibras como el agente con el menor costo de implementación; mientras que los polímeros por factores como la degradación y el oligopolio de los fabricantes, registran los mayores costos de inversión.

## 7.2.Recomendaciones

Se presentan algunas recomendaciones con el fin de brindar un mayor grado de profundidad al estudio de los Agentes Reductores de Arrastre realizado en el presente proyecto:

- La Efectividad de los Agentes Reductores de Arrastre se ve alterada por el tipo de flujo donde sean inyectados. Se debe aclarar la forma como actúan este tipos de sustancias en flujos de tuberías totalmente llenas, flujos estratificados y “slug flows” o flujo de Tapón, con el fin de identificar el mejor escenario para inyección.
- En el estudio de los Surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre, se analizó la importancia de la concentración crítica de formación de micelas (CMC) y las variables que de forma directa o indirecta afectaban su magnitud. Se recomienda profundizar en la manera como la CMC se ve afectada por el carácter hidrofóbico e hidrofílico de las moléculas de Surfactante.
- Una de las desventajas de los Surfactantes como Agentes Reductores de Arrastre, es el estrecho rango de temperaturas sobre los cuales son efectivos, dada su característica sensible a cambios en la energía del sistema. Se recomienda analizar el efecto de la concentración y del grupo alquilo de las moléculas de Surfactante, en las temperaturas críticas de inicio ( $T_1$ ) y fin ( $T_2$ ) del fenómeno de reducción de arrastre (Gráfica 5-3).
- En el Numeral 5.3 se estudió la importancia de la floculación de fibras para la generación de atenuaciones turbulentas. Sin embargo, dicha floculación se analizó como un fenómeno originado en un medio acuoso. Se recomienda investigar sobre las posibles influencias que podrían tener fluidos más viscosos como los crudos pesados sobre el evento de floculación de fibras.
- Se sabe con certeza que la eficiencia de las fibras empleadas en una suspensión radica en la relación entre la longitud y el diámetro, y en propiedades individuales como la textura superficial y rigidez de la fibra. Se recomienda investigar sobre el efecto que tienen las propiedades individuales de las fibras en la eficiencia de las Suspensiones de Fibras como Agentes Reductores de Arrastre.
- Dado que se pueden emplear fibras naturales o sintéticas para la formación de suspensiones, en el marco de la industria petrolera colombiana, se recomienda analizar la viabilidad de la implementación de fibras naturales como la cascarilla de arroz y las fibras de algodón. Esto con el fin de disminuir costos en la aplicación de Suspensiones de Fibras en oleoductos como el de OCENSA, conociendo su cercanía a una región como la de los llanos orientales, donde abundan este tipo de materiales agrícolas.
- Como se estudió en la sección de desventajas de los agentes reductores poliméricos, se debe analizar la compatibilidad entre la solución de polímeros y el crudo a transportar. Se recomienda investigar los criterios de compatibilidad manejados en la industria, con el fin de entender mejor la manera como se comportan este tipo de agentes reductores.
- El análisis llevado a cabo en el presente documento, se realizó partiendo del supuesto de que el tipo de fluido transportado no tiene incidencia alguna en la formación y evolución



de las estructuras turbulentas. Se recomienda investigar el fenómeno turbulento en el flujo de crudos pesados a través de tuberías presurizadas, con el fin determinar la existencia de diferencias importantes respecto a la turbulencia del flujo de agua en este tipo de tuberías.





## 8. REFERENCIAS

- Bai, D. R., Chen, K., & Renardy, Y. (1997). CORE-ANNULAR FLOWS. *Fluid Mechanics*, 29, págs. 65-90.
- BEGHELLO, L. (1998). THE TENDENCY OF FIBERS TO BUILD FLOCS. *Tesis*.
- Bemani, A., Basma, M., Yaghi, & ali. (10 de Noviembre de 2010). Heavy Crude Oil Viscosity Reduction for Pipeline Transportation. *Energy Sources*, 24(2), págs. 93-102.
- Bohórquez, J. M. (2012). *Uso de Agentes Reductores de Arrastre (Drag Reduction Agents) para Facilitar el Bombeo de Crudos Pesados*. Proyecto de Grado, Bogotá.
- Cámara Colombiana de Servicios Petroleros. (23 de Septiembre de 2009). *La Producción de los Distintos Tipos de Crudo en Colombia*. Recuperado el 21 de Febrero de 2013, de CAMAPETROL:  
[http://www.campetrol.org/index.php?searchword=La+Producci%C3%B3n+de+los+Distintos+Tipos+de+Crudo+en+Colombia&ordering=&searchphrase=all&Itemid=1&option=com\\_search](http://www.campetrol.org/index.php?searchword=La+Producci%C3%B3n+de+los+Distintos+Tipos+de+Crudo+en+Colombia&ordering=&searchphrase=all&Itemid=1&option=com_search)
- Cates, M. (1990). Statics and dynamics in worm-like surfactant. *J Phys Condens Matter*, págs. 69-92.
- Daaou, M., & Bendedouch, D. (1 de Julio de 2011). Water pH and surfactant addition effects on the stability of an Algerian crude oil emulsion. *Journal of Saudi Chemical Society*, págs. 333-337.
- Dearing, S., Vicentini, R., & Soldati, A. (30 de Mayo de 2010). Characteristic of Fiber Suspensions in a Turbulent Pipe Flow. *7th International Conference on Multiphase Flow*, 1-10. Tampa, Florida, U.S.A.
- Delfos René, H. J.-J. (6 de Abril de 2011). Experiments on drag reduction by fibres in turbulent pipe flow. *Udine: Lab. for Aero- and Hydrodynamics at JM Burgerscentrum for Fluid Mechanics*. Udine.
- Derakhshandeh, B., Kerekes, R., Hatzikiriakos, S., & Bennington, C. (22 de Abril de 2011). Rheology of pulp fibre suspensions: A critical review. *Chemical Engineering Science*(66), págs. 3461-3470.
- DUBIEF, Y., WHITE, C. M., TERRAPON, V. E., SHAQFEH, E. S., MOIN, P., & LELE, S. (2 de Junio de 2004). On the coherent drag-reducing and turbulence-enhancing behaviour of polymers in wall flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 514, págs. 271-280.



- El Tiempo. (2013). *En Bogotá, el metro cúbico de agua potable es el más caro del país*. Obtenido de El Tiempo: <http://m.eltiempo.com/colombia/en-bogota-el-metro-cubico-de-agua-potable-es-el-mas-carro-del-pais/7740549/1/home>
- Ezrahi, S., Tuval, E., & Aserin, A. (2006). Properties, main applications and perspectives of worm micelles. *Advances in Colloid and Interface Science*, págs. 77-102.
- F.-C. Li, Y. K. (29 de Junio de 2005). Reynolds-number dependence of turbulence structures in a drag-reducing surfactant solution channel flow investigated by particle image velocimetry. *PHYSICS OF FLUIDS*, 17, págs. 1-14.
- Facultad de Ingeniería UBA. (2007). *Tanques de almacenamiento de hidrocarburos*.
- Franck, A. J. (2007). Normal stresses in shear flow. *TA Instruments*, págs. 1-4.
- González, C. (Mayo de 2012). Perspectivas de la industria del petróleo y gas en América Latina y el Caribe. *VIII Congreso Internacional de Minería & Petróleo*. Cartagena, Bolívar, Colombia.
- Gosh, S., Mandal, T., Das, G., & Das, P. (2 de Septiembre de 2008). Review of oil water core annular flow. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, págs. 1957-1965.
- Hellsen, M. (Enero de 2001). Drag- Reducing Surfactants. *Journal of Surfactants and Detergents*, 4(1), págs. 65-70.
- HILLMANN. (2013). *Bombas Petroleo*. Recuperado el 6 de Junio de 2013, de [http://www.hillmann.com.ar/Catalogo/Bombas/DENTATORN/BTx/BT\\_.pdf](http://www.hillmann.com.ar/Catalogo/Bombas/DENTATORN/BTx/BT_.pdf)
- Hu, Y., & Matthys, E. F. (1995). Characterization of micellar structure dynamics for a drag-reducing surfactant solution under shear: normal stress studies and flow geometry effects. *Rheol*, págs. 450-460.
- JianZhong , L., & SuHua, S. (8 de Julio de 2010). A theoretical model of turbulent fiber suspension and its application to the channel flow. *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy*, 53(9), págs. 1659-1670.
- Jianzhong Lin, S. Z. (21 de Septiembre de 2006). Effect of Fibers on the Flow Property of Turbulent Fiber Suspensions in a Contraction. *Fibers and Polymers*, 8(1), págs. 60-65.
- Jubran, B., Zurigat, Y., & Goosen, M. (2005). Drag Reducing Agents in Multiphase Flow Pipelines: Recent Trends and Future Needs. *Petroleum Science and Technology*, págs. 1403- 1424.
- Kerekes, R. (Febrero de 1970). Turbulent Drag Reduction In Pipe Flow of Ideal Fibre Suspensions. *Ph.D Thesis*. Montreal, Quebec, Canadá.



Kerekes, R. J. (Febrero de 1970). Turbulent Drag Reduction In Pipe Flow of Ideal Fibre Suspensions. *Ph.D Thesis*. Montreal, Quebec, Canadá.

Langevin, D., Poteau, S., Hénaut, I., & Argilier, J. (2004). Crude Oil Emulsion Properties and their Application to Heavy Oil Transportation. *Oil & Gas Science and Technology*, 59(5), págs. 511-521.

Li, F.-C., Kawaguchi, Y., & Segawa, T. (29 de Junio de 2005). Reynolds-number dependence of turbulence structures in a drag-reducing surfactant solution channel flow investigated by particle image velocimetry. *PHYSICS OF FLUIDS*, 17, págs. 1-13.

LIDEM. (2013). *ROTATOR-Cortadora rotativa para triturar*. Recuperado el 6 de Junio de 2013, de LIDEM Maquinaria de corte y textil: <http://www.lidem.com/rotator-cortadora-rotativa-para-triturar/relacion-de-maquinas/rotator-cortadora-rotativa-para-triturar/maquina-de-corte-y-triturado-para-el-reciclaje-textil-al-mejor-precio>

Lindner, A., Vermant, J., & Bonn, D. (Mayo de 27 de 2003). How to obtain the elongational viscosity of dilute polymer solutions. *Physica A*, págs. 125-133.

Lumley, J. (1957). Ph. D Thesis, . *Jhon Hopkins University*.

Martínez-Palou Rafael, M. M.-R.-J.-H.-L. (26 de Noviembre de 2010). Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 75, págs. 274-282.

Ning, M., Wang, J. F., & Wei, J. (25 de Junio de 2011). Combined Effects of Temperature and Reynolds Number on Heat Transfer Characteristics of a Cationic Surfactant Solution. *Advances in Mechanical Engineering*, 2011, pág. 8.

NOVEM. (1 de Junio de 2013). *Lista de precios sistemas de bombeo*. Recuperado el 6 de Junio de 2013, de [http://www.novem.com.mx/pdf/NOVEM\\_LP\\_SBO.pdf](http://www.novem.com.mx/pdf/NOVEM_LP_SBO.pdf)

OCENSA. (2012). Modelo Estado Estable. Bogotá, Bogotá, Colombia.

Quesada, J. C. (2008). *TEMA 3: VISCOELÁSTICIDAD*.

Rodrigues, R. K., Ito, T. H., & Sabadini, E. (28 de Agosto de 2011). Thermal-stability of mixed giant micelles of alkytrimethylammonium surfactants and salicylate. *Journal of Colloid and Interface Science*, págs. 407-412.

Saldarriaga, J. G. (1998). *Hidráulica de Tuberías*. Bogotá: AlfaOmega-Uniandes ISBN.

SALEM, A., MANSOUR, A., & SYLVESTER, N. (13 de Marzo de 2007). THE EFFECT OF HETEROGENEOUS DRAG REDUCING SURFACTANT IN DRAG AND HEAT TRANSFER



REDUCTION IN CRUDE OIL SYSTEMS. *Chemical Engineering Communications*, págs. 229-242.

Saniere, A., Hénaut, I., & Arguilier, J. (2004). Pipeline Transportation of Heavy Oils, a Strategic, Economic and Technological Challenge. *Oil & Gas Science and Technology*, 59(5), págs. 455-466.

SPEIGHT, J. G. (2002). *Handbook of Petroleum Product Analysis*. Hoboken, New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC.

Sunthar, P. (2006). *Polymer Rheology*. Recuperado el 21 de Febrero de 2013, de Department of Physics, Indian Institute of Technology Madras: [//www.physics.iitm.ac.in/~compflu/Lect-notes/sunthar.pdf](http://www.physics.iitm.ac.in/~compflu/Lect-notes/sunthar.pdf)

VIRK, P. S. (21 de Julio de 1975). Drag Reduction Fundamentals. *AIChE Journal*, 21(4), págs. 625-656.

Wang, Y., Yu, B., Zakin, J. L., & Shi, H. (22 de Julio de 2011). Review on Drag Reduction and Its Heat Transfer by Additives. *Advances in Mechanical Engineering*, 2011, pág. 17.

Wisarn Yenjaichon, J. R. (2 de Septiembre de 2012). In-Line Jet Mixing of Liquid-Pulp-Fiber Suspensions: Effect of Fiber Properties, Flow Regime, and Jet Penetration. *AIChE Journal*, 00(0), págs. 1-11.

Yamanoia, M., & Maiaa, J. (13 de Mayo de 2010). Analysis of rheological properties of fibre suspensions in a Newtonian fluid by direct fibre simulation. Part1: Rigid fibre suspensions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*(165), págs. 1055-1063.

Zhou, Y.-B., Xu, N., Ma, N., Li, F.-C., Wei, J.-J., & Yu, B. (29 de Junio de 2011). On Relationships among the Aggregation Number, Rheological Property, and Turbulent Drag-Reducing Effect of Surfactant Solutions. *Advances in Mechanical Engineering*, 2011, págs. 1-5.