

**Cálculo de Pérdidas de Viscosidad en Soluciones Poliméricas por Efecto del Esfuerzo de
Cizalla en Procesos de Polymer Flooding.**

Juan Sebastián Castillo González

Luis Leonardo Vega Barba

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director:

Doctor Eider Niz Velásquez

Codirector:

Magister Gustavo Adolfo Maya Toro

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2018

Agradecimientos

Gracias a los ingenieros Gustavo Adolfo Maya Toro y Eider Niz Velásquez por su orientación en cuanto a entender el comportamiento de los polímeros en el sistema de transporte y por sus ideas para el desarrollo de la herramienta computacional.

Agradezco a mis padres que sin su ayuda incondicional me hubiera sido imposible terminar este proyecto. Gracias a los profesores de la escuela de ingeniería de petróleos por influir en mi desarrollo profesional como ingeniero.

Juan Sebastián Castillo González

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Reología del polímero EOR y ecuaciones de flujo para accesorios utilizados en Inyección de Polímeros	17
1.1 Relación de Movilidades	17
1.2 Viscosidad de la solución polimérica (Sorbie & Phil, S.F., Págs 37-39)	18
1.2.1 Viscosificación de los polímeros	20
1.3 Estabilidad de los polímeros	21
1.4 Ecuaciones de flujo de accesorios	26
1.5 Pérdidas de Presión debida a válvulas y accesorios	27
1.5.1 Coeficiente de resistencia K, longitud equivalente L/D y coeficiente de flujo	28
1.5.2 Condiciones de Flujo Laminar	30
1.5.3 Válvulas de paso reducido	31
1.5.4 Resistencia de las curvas	32
1.5.4.1 Curvas y codos de 90” con bridas o con extremos para soldar a tope	35
1.5.4.2 Resistencia de curvas para tubos en escuadra o falsa escuadra	36
1.6 Flujo en completamiento	37
1.6.1 Perforados	37
1.6.2 Completamiento hueco abierto con Slotted Liner	38
1.6.3 Yacimiento Fracturado	39

2. Parámetros en el flujo por accesorios, tubería, tubing y completamiento, relacionados con la degradación mecánica	40
2.1 Velocidad del fluido	40
2.2 Diámetro de la tubería	42
2.3 Factor de Fricción	45
2.4 Concentración Polimérica	46
2.5 Peso Molecular del Polímero	48
2.6 Tasa de cizalla	48
2.7 Flujo de cizallamiento constante de polímeros inelásticos y viscoelásticos	49
2.7.1 Polímeros inelásticos (Modelos reológicos)	52
2.7.2 Polímeros Viscoelásticos	56
3. Correlaciones de ecuaciones de flujo usadas para calcular la pérdida de viscosidad en tubería, accesorios, tubing y perforados	57
3.1 Cálculo de la tasa de cizalla en tuberías	60
3.2 Cálculo de la tasa de cizalla en accesorios	63
3.3 Cálculo de la tasa de cizalla en cara de pozo	64
3.3.1 Completamiento con Perforados	65
3.3.1.1 Perforados completamente colapsados	65
3.3.1.2 Perforados con máxima penetración	67
3.3.1.3 Perforados parcialmente colapsados	68
3.3.2 Completamiento en hueco abierto	69
3.3.3 Yacimiento Fracturado	69
3.4 Ejemplos	70

3.5 Cálculo de la viscosidad a partir de la tasa de cizalla	76
4. Validar la herramienta desarrollada y aplicarla a un caso de estudio	80
5. Resultados	89
6. Conclusiones	94
7. Recomendaciones	95
Referencias Bibliográficas	97
Apéndices	99

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Esquema de movimiento de una lámina de fluido en flujo de cizalla simple.....	14
<i>Figura 2.</i> La viscosidad versus la concentración para polímeros usados en aplicaciones de la industria petrolera: la tasa de cizalla de $7,3 \times 10^{-1}$ en un viscosímetro Brookfield, 1% NaCl a 74 °F.....	16
<i>Figura 3.</i> Pérdida de presión, producidas en un sistema.....	23
<i>Figura 4.</i> Flujo secundario en curvas.....	27
<i>Figura 5.</i> Coeficientes de curva deducidos por varios investigadores.....	29
<i>Figura 6.</i> Flujo secundario en curvas.	29
<i>Figura 7.</i> Codo de 90”	30
<i>Figura 8.</i> Tubos en escuadra.....	31
<i>Figura 9.</i> Tipos de perforados en un pozo. (a) representa las dimensiones de un cono, (b) representa los perforados al 100%, (c) representa perforados parcialmente colapsados, (d) representa perforados completamente colapsados	33
<i>Figura 10.</i> Representación gráfica de pozo a hueco abierto con slotted liner	34
<i>Figura 11.</i> Yacimiento fracturado. Representación gráfica del área por donde fluye la solución polimérica en un yacimiento fracturado.....	35
<i>Figura 12.</i> Velocidad de flujo promedio.	36
<i>Figura 13.</i> Experimentos a pequeña escala con solución polimérica de 1200 ppm. Cada gráfica	

representa la degradación de la solución muestreada en cada localidad de muestra como una función de la velocidad de fluido en el tubing. La degradación está relacionada a la viscosidad de la solución stock. Las mediciones de viscosidad fueron desarrolladas a $73^{\circ}\text{F} - 1$ 39

Figura 14 Degradación vs Distancia 42

Figura 15. Diferentes tipos de comportamiento esfuerzo de cizalla/ tasa de cizalla se encontró en los fluidos poliméricos; también se muestran los casos de sólido elástico y fluido ideal..... 45

Figura 16. El comportamiento de la viscosidad vs tasa de cizalla de una solución HPAM mostrando los efectos de la salinidad y el peso molecular (temperatura local): pesos moleculares de $A = 3 \times 10^6$ y $B = 5.5 \times 10^6$ 46

Figura 17. Modelos reológicos..... 51

Figura 18 Pérdida de viscosidad vs Tasa de cizalla, prueba de laboratorio FP-3230S 54

Figura 19 Valores rugosidades equivalentes para tuberías nuevas comerciales 56

Figura 20. Representación gráfica de un poro por el cual fluye la solución polimérica en el yacimiento..... 61

Figura 21. Representación gráfica de la prueba de laboratorio con el polímero FP-3230S, para posterior división y ajuste de modelos matemáticos..... 72

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Coefficiente de resistencia K, según su r/d</i>	30
Tabla 2. <i>Coefficiente de resistencia, según su ángulo θ</i>	31
Tabla 3. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad, según el caudal de flujo en tubería de superficie</i>	75
Tabla 4. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 500 psi</i>	76
Tabla 5. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1000-5000bbl/día) de flujo en tubing a 400 psi</i>	77
Tabla 6. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 420 psi</i>	77
Tabla 7. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 440 psi</i>	78
Tabla 8. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 460 psi</i>	78
Tabla 9. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 480 psi</i>	79
Tabla 10. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 500 psi</i>	79

Tabla 11. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en perforados 80% colapsados.</i>	80
Tabla 12. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en hueco abierto con slotted liner.</i>	81
Tabla 13. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en yacimiento fracturado</i>	82
Tabla 14. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el porcentaje de colapso de las perforaciones.</i>	83
Tabla 15. <i>Datos de constante de resistencia, diámetro y longitud de las válvulas utilizadas en la herramienta computacional.</i>	85
Tabla 16. <i>Datos de pérdidas de viscosidad según el tipo de válvula.</i>	86
Tabla 17. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el diámetro de la tubería en superficie.</i>	87
Tabla 18. <i>Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según caída de presión y cambio de caudal en el tubing.</i>	87

RESUMEN

TITULO: CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE VISCOSIDAD EN SOLUCIONES POLIMÉRICAS POR EFECTO DEL ESFUERZO DE CIZALLA EN PROCESOS DE POLYMER FLOODING.¹

AUTOR: JUAN SEBASTIAN CASTILLO GONZÁLEZ, LUIS LEONARDO VERGA BARBA²

PALABRAS CLAVE: VISCOSIDAD, HERRAMIENTA COMPUTACIONAL, SOLUCIÓN POLIMERICA, CIZALLAMIENTO.

En el diseño de un sistema de inyección de polímeros en etapa piloto se debe conocer la viscosidad con la que llega el fluido polimérico al yacimiento debido a que la eficiencia del desplazamiento de aceite en el subsuelo depende de la viscosidad del fluido desplazante.

Partiendo de parámetros geométricos y dinámicos de los componentes de un sistema de inyección de polímeros y las propiedades de la solución polimérica en superficie, se determina por medio de una herramienta computacional la viscosidad perdida cuando la solución polimérica fluye a través del sistema. La herramienta despliega información relevante como las pérdidas de carga, caídas de presión, tasa de cizallamiento generada y el porcentaje de viscosidad perdida en el sistema de tubería y accesorios en superficie, sistema de inyección y completamiento. Esta herramienta es crucial para facilitar el diseño de las facilidades de superficie.

Además, se crea un conjunto de hojas de cálculo en Microsoft Excel que proporcionan al usuario una guía de referencia teórica sobre las ecuaciones utilizadas para cada proceso, además de la estructura general de la herramienta. Por último, se realiza una validación del programa utilizando datos de superficie y subsuelo de un campo operado por Ecopetrol en el Valle Medio del Magdalena.

Al utilizar un lenguaje de programación orientado a objetos para la creación de la herramienta, se tiene como resultado una aplicación dinámica y de fácil manejo facilitando al usuario entender el impacto en la viscosidad de cada elemento del piloto y controlando dicha propiedad en el proceso de construcción de un piloto de inyección de polímeros.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Diseño Industrial. Director: Eider Niz Velásquez, Ingeniería de Petróleos.

ABSTRACT

TITLE: CALCULATION OF VISCOSITY LOSSES IN POLYMERIC SOLUTIONS DUE TO SHEAR STRESS IN POLYMER FLOODING PROCESSES.³

AUTHOR: JUAN SEBASTIAN CASTILLO GONZÁLEZ, LUIS LEONARDO VERGA BARBA⁴

KEY WORDS: VISCOSITY, SOFTWARE, POLYMER SOLUTION, SHEARING.

In the design of a polymer injection system in the pilot stage, the viscosity with which the polymeric fluid reaches the reservoir must be known, because the efficiency of the displacement of oil in the subsoil depends on the viscosity of the displacing fluid.

Starting from the geometric and dynamic parameters of the components of a polymer injection system and the properties of the polymer solution on the surface, the viscosity lost when the polymer solution flows through the system is determined by means of a software. The tool displays relevant information such as head losses, pressure drops, shear rate generated and the percentage of viscosity lost in the pipe system and surface accessories, injection system and completion. This tool is crucial to facilitate the design of surface facilities.

In addition, a set of spreadsheets is created in Microsoft Excel that provide the user with a theoretical reference guide on the equations used for each process, as well as the general structure of the tool. Finally, the program is validated using surface and subsoil data from a field operated by Ecopetrol in the Middle Magdalena Valley.

By using an object-oriented programming language for the creation of the tool, a dynamic and easy to use application is obtained, facilitating the user to understand the impact on the viscosity of each element of the pilot and controlling this property in the construction process of a polymer injection pilot.

³ Trabajo de grado.

⁴ Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Diseño Industrial. Director: Eider Niz Velásquez, Ingeniería de Petróleos.

Introducción

En el proceso de recobro mejorado por inyección de polímeros, se desplaza una solución polimérica a través de la formación para efectuar un barrido más eficiente del volumen comprendido entre los pozos inyectoros y productores, que el que pudiera lograrse con la inyección de agua. La mejora en el barrido es función de la viscosidad con la que la solución polimérica llega al yacimiento. Las soluciones poliméricas sufren degradación mecánica (entre otros tipos) al atravesar el sistema de inyección. La cuantificación de la pérdida de viscosidad asociada a esta degradación es necesaria para el diseño adecuado de un sistema de inyección de polímeros (Niz Velásquez ,2018).

El presente trabajo de grado consiste en el desarrollo de una herramienta computacional para el diseño de pilotos de inyección de polímeros. Esta herramienta construida en lenguaje VISUAL BASIC se centra en la estimación de la pérdida de viscosidad de la solución polimérica debido a la degradación mecánica ejercida por los componentes en superficie, sistema de inyección y completamiento de un piloto de inyección de polímeros utilizando las correlaciones entre parámetros reológicos y el flujo en accesorios que rigen este tipo de degradación. Al mismo tiempo presenta al usuario una interfaz que muestra las caídas de presión y la viscosidad perdida asociada a cada accesorio que se utilice. Esta herramienta esta explicada en forma de tutorial en el Anexo 1.

El primer capítulo se centra en detallar la reología del polímero EOR y las ecuaciones de flujo de las tuberías, accesorios y completamiento utilizado en un piloto de inyección de polímeros.

Además, se describe la construcción del concepto de viscosidad y se dan a conocer parámetros como la tasa de cizallamiento.

El segundo capítulo identifica los parámetros en el flujo por los componentes del piloto que se relacionan con la degradación mecánica, definiendo cada uno bajo las condiciones presentadas en transporte a escala de campo.

Posteriormente, el tercer y cuarto capítulo enuncia el parámetro con el que se puede correlacionar el flujo presentado en los componentes del piloto con el comportamiento reológico del fluido transportado. Describe las expresiones matemáticas con las cuales se puede evidenciar el efecto de las condiciones de transporte en la viscosidad.

En el quinto capítulo se utilizan los datos de un campo operado por ECOPEPETROL como variables de entrada para validar la herramienta, y se analizan los valores resultantes.

Por último, se describen a manera de conclusión los límites de diseño en la construcción de un piloto de inyección de polímeros para que el fluido pierda la menor viscosidad posible y de esta forma sea eficiente el proceso de barrido de aceite en el yacimiento.

1. Reología del polímero EOR y ecuaciones de flujo para accesorios utilizados en Inyección de polímeros.

1.1 Relación de Movilidades

A partir de la relación de movilidades se puede apreciar cómo se mejora la inyección de agua usando polímeros:

$$\frac{k_{\text{eff}}}{\mu} = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{k_{\text{eff}}}{\mu} \frac{\mu}{\mu}$$

Donde λ es la movilidad, μ la viscosidad y k la permeabilidad efectiva. El aceite que es dejado atrás en un proceso de inyección de agua (residual) se explica por entrampamiento capilar, o la dominancia de las fuerzas capilares sobre las fuerzas viscosas (Dullien 1979). Adicionalmente parte del aceite no llega a ser contactado por el agua debido a que esta se mueve por canales preferenciales por efecto de digitación viscosa o por heterogeneidades. De esta forma, el objetivo de la inyección de polímeros es desplazar el aceite no contactado, mas no el aceite residual. El rol de los polímeros es mejorar la eficiencia de desplazamiento macroscópico en aquellos casos mediante la disminución de la movilidad efectiva, principalmente mediante el incremento de la viscosidad del agua μ , y también mediante la disminución de la permeabilidad de la fase acuosa, k_{eff} .

Un barrido vertical pobre de la inyección de agua se debe principalmente a la heterogeneidad en el yacimiento. Uno de los principales tipos de heterogeneidad es el “layering” a gran escala,

donde los estratos de alta permeabilidad pueden ser adyacentes a muchas capas de baja permeabilidad. Este tipo de heterogeneidad lleva a una irrupción temprana de agua en desplazamientos, y por lo tanto a una eficiencia de barrido vertical pobre, incluso si la relación de movilidades para la inyección de agua es favorable ($M < 1$). El rol del polímero en estos sistemas es reducir M , frecuentemente a un valor menor que la unidad (típicamente a $M \sim 0,1 - 0,3$), lo que mejora el barrido vertical principalmente como un resultado de los efectos viscosos del flujo-cruzado. El principal objetivo de los polímeros es remediar los problemas con la inyección de agua debido a una alta M o debido a la heterogeneidad (Sorbie & Phil, s.f., págs. 1-3).

1.2 Viscosidad de la solución polimérica (Sorbie & Phil, s.f., págs. 37-39)

La viscosidad de un fluido se define como la resistencia al cizallamiento. El esfuerzo de cizalla τ entre 2 capas delgadas del fluido es:

$$\tau = \frac{\eta (\Delta v / \Delta y)}{\Delta y}$$

El gradiente de velocidad del fluido laminar en la pequeña distancia entre hojas es lineal para varios fluidos. Los experimentos muestran que para varias clases de fluidos:

$$\tau \propto \frac{\eta V}{r}$$

Donde r es la distancia entre las superficies, y V es la velocidad de la superficie superior. Combinando las ecuaciones anteriores y considerando que V/r es un gradiente diferencial de velocidad.

$$\tau \propto \frac{\eta V}{r}$$

Donde (dV/dr) es la velocidad de deformación que en este caso es la tasa de cizalla. Las dimensiones de dV/dr son mostradas como $[L^{-1}T^{-1}]$. En este trabajo de grado utilizaremos el término shear rate.

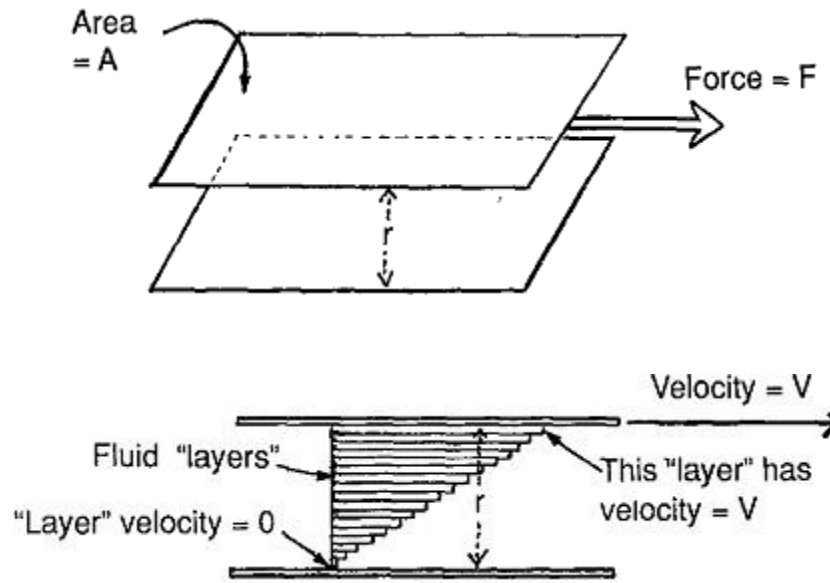


Figura 1. Esquema de movimiento de una lámina de fluido en flujo de cizalla simple.

Nota. Adaptado de: Sorbie.K. S, Phil, D. (s.f.) Polymer-Improved Oil Recovery, reader in petroleum engineering, department of petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh.

Para algunos fluidos la proporcionalidad entre τ y $\left(\frac{dV}{dr}\right)$ en la ecuación anterior es constante sobre un amplio rango de tasas de deformación. Para estos fluidos:

$$\tau = -\mu \left(\frac{dV}{dr} \right) = \mu \dot{\gamma}$$

Donde μ es la viscosidad (constante y $\dot{\gamma}$ es la tasa de cizalla. Estos fluidos se conocen como Newtonianos. Existen varias clases de fluidos para los que la viscosidad no permanece constante a diferentes tasas de deformación, estos se expresan así:

$$\eta = -\tau \left(\frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}} \right) = \eta(\dot{\gamma})^2$$

Donde η es ahora una función de viscosidad que depende de la tasa de cizalla y los fluidos que muestran este comportamiento son los No newtonianos. Las soluciones poliméricas muestran un comportamiento de flujo No newtoniano a concentraciones altas de polímero.

1.1.1 Viscosificación de los polímeros (Sorbie & Phil, s.f., págs. 42-43) Una interpretación física de cómo es el proceso de viscosificación por parte de los polímeros se da a través de la disipación de energía que resulta de las interacciones moleculares. Las cadenas largas de polímeros tienen varias formas de movimiento, y pueden interactuar a lo largo de toda la longitud de la cadena con las moléculas del solvente. A partir de que los polímeros disipan más energía que las soluciones de bajo peso molecular, la viscosidad de los polímeros es mayor que la de los líquidos constituidos por pequeñas moléculas. De hecho, la tasa de disipación de energía Q , en el flujo simple de cizalla se da como:

$$Q = \eta \dot{\gamma}^2$$

Donde Q depende directamente de la viscosidad del fluido y del cuadrado de la tasa de cizalla. La interacción entre las cadenas poliméricas y las moléculas del solvente que subyace el efecto viscosificante del polímero está relacionada con los efectos friccionales encontrados en la sedimentación y difusión. Un ejemplo del efecto viscosificante de algunos polímeros IOR se muestra en la siguiente figura. Nótese que incluso a concentraciones relativamente bajas de unos pocos cientos de ppm, los polímeros pueden incrementar la viscosidad del agua por factores de 10-100.

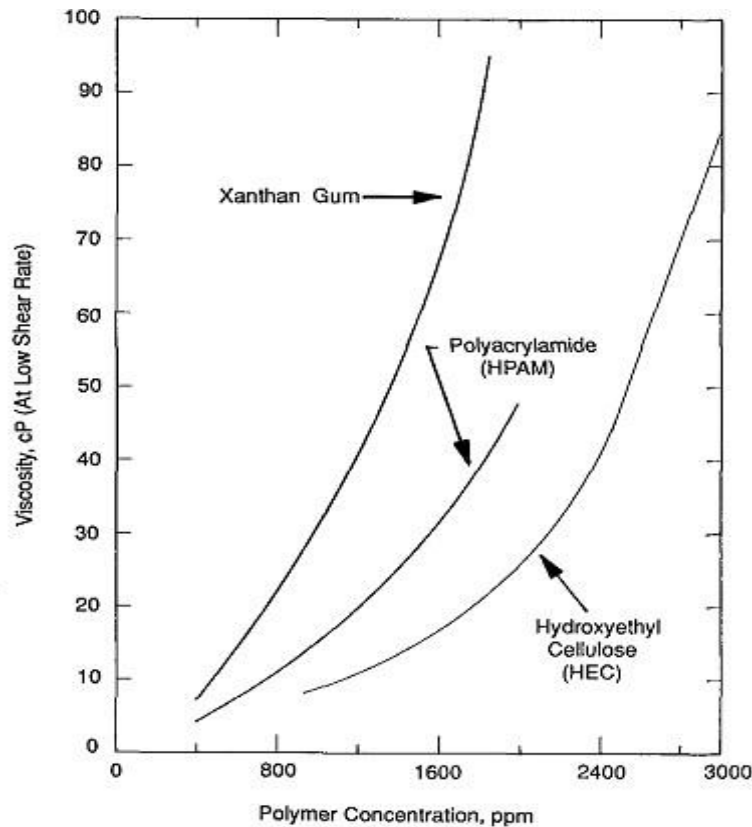


Figura 2. La viscosidad versus la concentración para polímeros usados en aplicaciones de la industria petrolera: la tasa de cizalla de $7,3 \text{ s}^{-1}$ en un viscosímetro Brookfield, 1% NaCl a $74 \text{ }^\circ\text{F}$. Nota. Adaptado de: Sorbie.K. S, Phil, D. (s.f.) Polymer-Improved Oil Recovery, reader in petroleum engineering, department of petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh.

1.3 Estabilidad de los polímeros

Cuando los polímeros son utilizados en operaciones de recobro mejorado, sus propiedades no son rápidamente degradadas. La principal propiedad de interés es generalmente la viscosidad de la solución polimérica, a pesar de que, para algunos polímeros, su habilidad para reducir la permeabilidad del yacimiento puede también ser algo importante. La degradación del polímero se refiere a cualquier proceso que pueda romper la estructura molecular de la macromolécula. La

degradación mecánica describe la ruptura de una molécula en la región de alta tasa de flujo cerca del pozo como un resultado de los esfuerzos mecánicos altos en la macromolécula. Este es un efecto a corto plazo y solamente es importante en el yacimiento cerca de la cara de formación y algunas veces en los equipos de manejo de polímeros y choques (Sorbie & Phil, s.f., págs. 37-83). Existen varios tipos de degradación, las cuales son biológica, química, térmica, y mecánica. Este proyecto de grado se centra en la degradación mecánica.

Degradación Biológica: Se refiere al rompimiento microbiano de macromoléculas - ambos polímeros y sintéticos- mediante bacterias durante el almacenamiento o en el yacimiento. Esto es solo importante a bajas temperaturas o en la ausencia de biocidas efectivos

Degradación Química: Se refiere a la ruptura de las moléculas del polímero, ya sea por medio del ataque de contaminantes como el oxígeno, o a través del ataque a largo plazo de la columna molecular principal mediante procesos como la hidrólisis. También con el aumento de la concentración salina, las soluciones poliméricas muestran una fuerte disminución en la viscosidad. El efecto de iones divalentes es aún más pronunciado que el de iones monovalentes; La presencia de cationes divalentes en pequeñas cantidades puede ocasionar, incluso, el fenómeno de floculación del polímero. Este efecto salino es de importancia en polímero con grupos ionizables.

Degradación térmica: hay dos factores que deben ser considerados, primero la temperatura a la que se somete el polímero, y segundo el período de tiempo que se mantenga esta condición. En general, las soluciones poliméricas pierden viscosidad con el incremento de la temperatura; por otro lado, cuando las soluciones de polímeros pasan períodos de tiempo prolongados a elevadas temperaturas, ocurre degradación de las cadenas poliméricas, lo cual también afecta la viscosidad de la solución.

Degradación mecánica: Tom y Mysels (1948) mostraron que la adición de cantidades mínimas de largas cadenas poliméricas decrece la caída de presión en una tubería a una tasa de flujo dada. La eficiencia de la reducción de fricción se correlaciona directamente con el acople entre el campo local elongacional del flujo turbulento y las propiedades extensionales del agente reductor de fricción. Las cadenas de polímeros flexibles tienen la habilidad para ser extendidas mediante el flujo y así desarrollar una viscosidad elongacional que limita la extensión de turbulencia mediante la supresión de la mayoría de energía disipada de remolinos de pequeña escala (Durst 1982, Jovanovic, 2006).

Sin embargo, el alargamiento de las cadenas poliméricas da lugar a la ruptura de la cadena, que en efecto decrece el efecto de la reducción de fricción. Como lo predijo De Gennes (1974), cuando el tiempo característico del flujo extensional, λ_{ext} , es menor que el tiempo de relajación de las cadenas poliméricas, λ , las bobinas poliméricas podrían experimentar una transición repentina de alargamiento de espiral (Keller and Odell, 1985). En régimen diluido, esta transición podría así ocurrir a una tasa de estrés crítica, $\dot{\epsilon}_c$ tal que el número de Deborah $De = \lambda \dot{\epsilon}_c \approx 1$.

Usando la ley de Stoke para estimar la fricción ejercida por el solvente en un alargamiento de cadena en un campo de flujo elongacional, Odell y Keller (1986) encontraron que la distribución de los esfuerzos en las macromoléculas es parabólica con su máximo en el centro. La tensión, T , ejercida en el punto medio de la cadena es proporcional a la viscosidad del solvente, η , la tasa extensional, $\dot{\epsilon}$, y el cuadrado de la longitud de la cadena, L , tal que $T \propto \eta \dot{\epsilon} L^2$. Por lo tanto, si el tiempo en el campo elongacional es suficiente, esto podría dar lugar al alargamiento completo de la cadena desde que las fuerzas se incrementan con la longitud extendida de la cadena. Como un resultado del máximo esfuerzo ejercido en el punto medio de la cadena, se espera que la incisión de la cadena ocurra a la mitad de la cadena si la tasa de estrés es suficiente para romper el enlace

de la cadena de la columna de la macromolécula. La tasa de estrés para fracturar $\dot{\epsilon}_c$ debería ser $\dot{\epsilon}_c \sim M^{-1}$ donde M es el peso molecular de la cadena.

En flujos transitorios elongacionales tales como el flujo a través de una contracción abrupta, la tasa de estrés para fractura fue encontrada como $\dot{\epsilon}_c \sim M^{-1}$ (Nguyen and Kausch, 1988). En este tipo

de flujo, el tiempo de residencia es pequeño y las cadenas no tienen suficiente tiempo para extenderse totalmente. Sin embargo, la ruptura del enlace es todavía un proceso no aleatorio y ocurre preferencialmente en el punto medio de la cadena. Recientemente, Vanapalli propuso un modelo de degradación de cadena en flujo turbulento basado en la cascada de Kolmogorov que unifica los puntos de estagnación. A la escala de Kolmogorov, la fuerza de fricción máxima en la cadena está dada por $F \sim \rho \nu^2 \ln(\lambda)$, implica que la tasa de estrés crítica para fractura escala

universalmente con $\dot{\epsilon}_c \sim \nu^{-2} \ln(\lambda)$. Este modelo fue soportado por resultados de degradación en flujo turbulento por tubería a un número de Reynolds mayor a 10^5 .

En el régimen semidiluido, donde la superposición de cadena existe, las cadenas podrían ser extendidas pero la estructura en red podría afectar fuertemente el mecanismo de degradación (Cates 1993). Si las cadenas tienen suficiente tiempo para desenredarse, las cadenas de alto peso molecular podrían ser preferencialmente degradadas con una abertura en su centro (Clay and Koelling 1997). Por otra parte, si las cadenas no tienen tiempo para desenredarse durante el proceso de alargamiento, la degradación debería ocurrir entre los puntos de unión correspondientes a un proceso aleatorio (Muller et al, 1992). En este caso, el estado final de la cadena ya no es dependiente en el peso molecular, pero si en la característica de la red tal como la densidad de enredo c/c^* (Dupas 2012).

Cualquiera sea el tipo de flujo y el régimen de concentración, existe un aspecto cinético para la degradación, para los que los modelos han sido presentados (Nguyen and Kausch, 1989, Brostow 2008). En efecto, pasar una vez por la geometría de degradación no es suficiente para alcanzar la distribución de peso molecular del polímero. El campo de flujo elongacional no es uniforme. Por lo tanto, en cada pasaje, existe una probabilidad de escisión de cadena dependiendo en la posición de la espiral en el flujo del campo. Las cadenas de alto peso molecular podrían ser preferencialmente rotas. En una geometría dada, el primer pasaje podría tener el impacto más grande en el nivel de degradación. La degradación en los pasajes siguientes podría continuar, pero a una extensión más pequeña hasta alcanzar el estado estable donde todas las cadenas han sido sometidas a la tasa de esfuerzo y no son rompibles por el flujo del campo. ¹

Vanapalli (2006) formuló una teoría de escalamiento simple para una escisión de cadena en flujo turbulento. Él consideró la interacción de las cadenas poliméricas extendidas con fluctuaciones turbulentas desde la perspectiva de escalamiento de la cascada de Kolmogorov. Obtuvo la expresión de la fuerza de fricción experimentada por las cadenas poliméricas extendidas.

$$F_{fric} = A \frac{\eta^2 L^3}{4 \eta^2 \ln\left(\frac{L}{a}\right)}$$

Donde A es una constante, a es el diámetro de la cadena, η es la viscosidad, L es la longitud de la cadena, D es el diámetro de la tubería. La fuerza ejercida en la cadena está relacionada con $\frac{\eta^3}{D^2}$. Desde esta ecuación se puede calcular la velocidad crítica Vc a la que la degradación mecánica podría ocurrir para un diámetro de tubería dado.

¹ La reducción de fricción, transición de alargamiento de espiral y degradación polimérica. SPE 169699 MS.

1.4 Ecuaciones de flujo de accesorios

Una solución está fluyendo en una tubería de diámetro D (en mts) a una tasa de flujo Q en (m^3/s).

El promedio de la velocidad V (en m/s) es dado por:

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

El número de Reynolds está definido por:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Donde ρ es la densidad del fluido en (kg/m^3), μ es la viscosidad del fluido (en Pa.seg)

Para fluidos No Newtonianos, un número generalizado de Reynolds es definido tomando en cuenta el comportamiento de la viscosidad en la ley de energía del polímero $\mu = \mu_0 \dot{\gamma}^{n-1}$ donde K es el índice de consistencia (viscosidad a un shear rate de 1 s^{-1}) y n es el índice del comportamiento de flujo (<1 para adelgazamiento del fluido por cizalla tal como el HPAM).

$$Re_{gen} = \frac{\rho V^{2-n} D^n}{8^{n-1} \mu_0 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1}}$$

La caída de presión friccional (en Pascales) para una longitud L (en metros) de tubería es:

$$\Delta P = \frac{f L V^2}{2D}$$

Donde f es el coeficiente de factor de fricción de Fanning.

En flujo turbulento, para tuberías lisas, f puede ser expresado por la correlación de Blasius.

$$f = 0.079 Re^{-0.25}$$

Para tuberías rugosas, f puede ser expresado por la correlación de Churchill:

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (f + \frac{121}{Re})^{-1.5} \right]$$

Con $f = [2.457 \ln \left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \left(\frac{1}{Re} \right)^{16} \right)]$

$Y f = \left[\frac{37530}{Re} \right]^{16}$

1.5 Pérdidas de presión debida a válvulas y accesorios

Cuando un fluido se desplaza uniformemente por una tubería recta, larga y de diámetro constante, la configuración del flujo indicada por la distribución de la velocidad sobre el diámetro de la tubería adopta una forma característica. Cualquier obstáculo en la tubería cambia la dirección de la corriente en forma total o parcial, altera la configuración característica de flujo y ocasiona turbulencia, causando una pérdida de energía mayor de la que normalmente se produce en un flujo por una tubería recta. Ya que las válvulas y accesorios en una línea de tuberías alteran la configuración de flujo, producen una pérdida de presión adicional.

La pérdida de presión total producida por una válvula o accesorio consiste en:

1. La pérdida de presión dentro de la válvula.
2. La pérdida de presión en la tubería de entrada es mayor de la que se produce normalmente si no existe válvula en la línea. Este efecto es pequeño.
3. La pérdida de presión en la tubería de salida es superior a la que se produce normalmente si no hubiera válvula en la línea. Este efecto puede ser muy grande.

Desde el punto de vista experimental es difícil medir las tres caídas por separado. Sin embargo, su efecto combinado es la cantidad deseada y puede medirse exactamente con métodos bien conocidos.

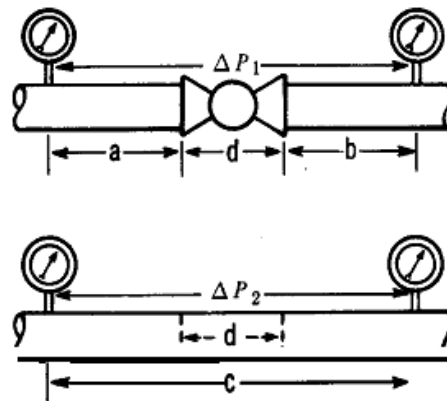


Figura 3. Pérdida de presión, producidas en un sistema.

Nota. Adaptado de: Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, división de ingeniería de Crane. McGraw-Hill.

La figura muestra tramos de tubería del mismo diámetro y longitud. El tramo superior contiene una válvula de globo. Si las pérdidas de presión ΔP_1 y ΔP_2 se miden entre los puntos indicados, se encuentra que ΔP_1 es mayor que ΔP_2 . En realidad, la pérdida debida a la válvula de longitud “d” es ΔP_1 menos la pérdida en un tramo de tubería con longitud “a+b”.

1.5.1 Coeficiente de resistencia K, longitud equivalente L/D y coeficiente de flujo Existen datos sobre pruebas de pérdida de presión para una amplia variedad de válvulas y accesorios, fruto del trabajo de muchos investigadores. Se han realizado estudios en este campo por los laboratorios de Crane; sin embargo, debido al tiempo y costo de tales pruebas, en la práctica es imposible obtener datos de pruebas de cada medida, tipo de válvula y conexión.

Por lo anterior, es deseable proporcionar medios confiables de extrapolación de la información disponible sobre pruebas para abarcar aquellos elementos que no han sido o no pueden ser probadas con facilidad. Los conceptos que a menudos se usan para llevar a cabo esto son la “longitud equivalente L/D”, “coeficiente de resistencia K”, y “coeficiente de flujo Cv o Kv”.

Las pérdidas de presión en un sistema de tuberías se deben a varias características del sistema, que pueden clasificarse como sigue:

1. Rozamiento en las paredes de la tubería, que es función de la rugosidad de la superficie interior de la misma, del diámetro interior de la tubería y de la velocidad, densidad y viscosidad del fluido.
2. Cambios de dirección del flujo.
3. Obstrucciones en el paso del flujo.
4. Cambios repentinos o graduales en la superficie y contorno del paso del flujo.

La velocidad en una tubería se obtiene mediante la presión o altura estática, y el descenso de la altura estática o pérdida de presión debida a la velocidad es

$$h_v = \frac{v^2}{2 * g}$$

Que se define como “altura de velocidad”. El fluido por una válvula o accesorio en una línea de tubería causa también una reducción de la altura estática, que puede expresarse en función de la altura de velocidad. El **coeficiente de resistencia K** en la ecuación,

$$h_v = K \frac{v^2}{2g}$$

Se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio. Está siempre asociado con el diámetro al cual se refiere la velocidad. En la mayor parte de las válvulas o

accesorios las pérdidas por fricción (punto 1 de los mencionados), a lo largo de la longitud real de flujo, son mínimas comparadas con las debidas a uno o más de los otros 3 puntos mencionados.

Por esto el coeficiente de resistencia K se considera independiente del factor de fricción y del número de Reynolds, que puede tratarse como constante para cualquier obstáculo dado en un sistema de tuberías bajo cualquier condición de flujo, incluida la de régimen laminar.

La misma pérdida para una tubería recta se expresa por la ecuación de Darcy:

$$h_f = \left(K \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g}$$

De donde resulta que:

$$K = \left(\frac{L}{D} \right) \frac{2g}{V^2}$$

La relación L/D es la longitud equivalente en diámetros de tubería recta que causa la misma pérdida de presión que el obstáculo, en las mismas condiciones de flujo. Ya que el coeficiente de resistencia K es constante para cualquier condición de flujo, el valor de L/D para cualquier válvula o accesorio dados, debe variar de modo inverso al cambio del factor de fricción para las condiciones diferentes de flujo.

1.5.2 Condiciones de flujo laminar En las instalaciones de tuberías, el flujo cambia de régimen laminar a turbulento dentro de límites del número de Reynolds de 2000 a 4000. El número de Reynolds crítico inferior, es 2000 que se reconoce por lo general como el límite superior al aplicar la ley de Poiseuille para flujo laminar en tuberías rectas,

$$h_f = 3.263 \frac{L \mu V}{D^2}$$

$$h_f = 0.0962 \left(\frac{L \mu V}{D^2} \right)$$

Que es idéntica a la ecuación $h = \frac{f L v^3}{2g D^5}$, al introducir el valor del factor de fricción para

un flujo laminar $Re < 64$, el flujo laminar con números de Reynolds superiores a 2.000 es inestable, y la zona crítica y límites inferior de la zona de transición, mezcla turbulenta y movimiento laminar, pueden alternarse de modo imprevisto.

La ecuación $h_f = \frac{K v^3}{2g D^5}$ es válida para calcular la pérdida de presión en válvulas y accesorios para todas las condiciones de flujo, incluyendo flujo laminar, usando el coeficiente de resistencia K. Cuando esta ecuación se utiliza para determinar las pérdidas en tubería recta, es necesario calcular el número de Reynolds estableciendo así el factor de fricción f y usándolo para determinar el valor del coeficiente de resistencia K de la tubería, según la ecuación $f = \frac{K}{Re}$.

1.5.3 Válvulas de paso reducido Las válvulas, a menudo, se diseñan con diámetros de paso reducidos, y la transición del asiento a los extremos de la válvula puede ser brusca o gradual. Los tipos con paso recto, tales como válvulas de compuerta y de bola, diseñados con transición gradual, reciben el nombre de válvulas Venturi.

Los análisis de las pruebas con este tipo de válvulas, indican una excelente correlación entre los resultados de las pruebas y los valores calculados de K basados en la suma de las ecuaciones:

$\beta = \frac{D_2}{D_1}$ valor del coeficiente de resistencia en términos de la tubería más grande, donde β es la relación de diámetros de tuberías pequeña y grande.

$\beta \leq 45^\circ \dots \dots \dots \beta_2 = \frac{2.6 \beta^2 (1 - \beta^2)^2}{\beta^4}$, ecuación para ensanchamientos bruscos y graduales.

$\beta \leq 45^\circ \dots \dots \dots \beta_2 = \frac{0.8 \beta^2 (1 - \beta^2)}{\beta^4}$, ecuación para estrechamientos bruscos y graduales.

Las válvulas que presentan un cambio en la dirección del paso del fluido, como las válvulas de globo y angulares, son clasificadas como válvulas de alta resistencia. Las anteriores ecuaciones para ensanchamientos y estrechamientos graduales no pueden aplicarse directamente a estas configuraciones, porque los ángulos de convergencia y divergencia son variables respecto de los distintos planos de referencia.

1.5.4 Resistencia de las curvas

Flujo secundario: La naturaleza del flujo de líquidos en las curvas ha sido investigada completamente, y se han descubierto muchos aspectos interesantes. Por ejemplo, cuando un fluido pasa por una curva, ya sea en régimen laminar o turbulento, se establece en la curva una condición conocida como “flujo secundario”. Este es un movimiento de rotación perpendicular al eje de la tubería, que se superpone al movimiento principal en la dirección del eje. La resistencia debida a la fricción de las paredes de la tubería y la acción con la fuerza centrífuga combinadas producen esta rotación. La siguiente figura ilustra el fenómeno.

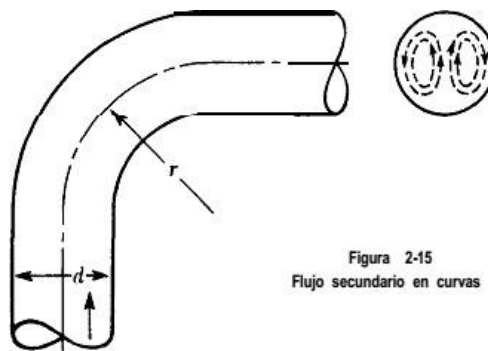


Figura 4. Flujo secundario en curvas.

Nota. Adaptado de: Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, división de ingeniería de Crane. McGraw-Hill.

Resistencia de las curvas al flujo: En forma convencional, se considera que la resistencia o pérdida de presión en una curva se compone de:

1. La pérdida debida a la curvatura.
2. La pérdida excesiva en la tangente corriente abajo.
3. La pérdida debida a la longitud.

Por lo tanto:

$$h_{\text{total}} = h_{\text{curvatura}} + h_{\text{tangente}} + h_{\text{longitud}}$$

En donde:

h_{total} = Pérdida total, en metros de columna de fluido (en pies).

h_{tangente} = Pérdida excesiva en la tangente corriente abajo, en metros de columna de fluido (en pies).

$h_{\text{curvatura}}$ = Pérdida debida a la curvatura, en metros de columna de fluido (en pies).

h_{longitud} = Pérdida en la curva debida a la longitud, en metros de columna de fluido (en pies).

Si $h_{\text{total}} = h_{\text{curvatura}} + h_{\text{longitud}}$

Entonces: $h_{\text{total}} = h_{\text{curvatura}} + h_{\text{longitud}}$

Sin embargo, la cantidad $h_{\text{curvatura}}$ puede expresarse en función de la altura de velocidad en la fórmula:

$$h_{\text{curvatura}} = K_c \frac{v^2}{2g}$$


Donde:

K_c = Coeficiente de la curva.


v = Velocidad del fluido, en pies por segundo (pie / seg).

g = 9.81 metros por segundo por segundo (32,2 pies / g^2).

La relación entre K_c y r/D (radio relativo) no está bien definida, como puede verse en la



siguiente figura. Las curvas en este nomograma indican que K_c tiene un valor mínimo cuando



está entre 3 y 5. El radio relativo de una curva es la relación entre el radio del eje de la curva y el diámetro interno de la tubería. Ambas dimensiones deben estar en las mismas unidades.

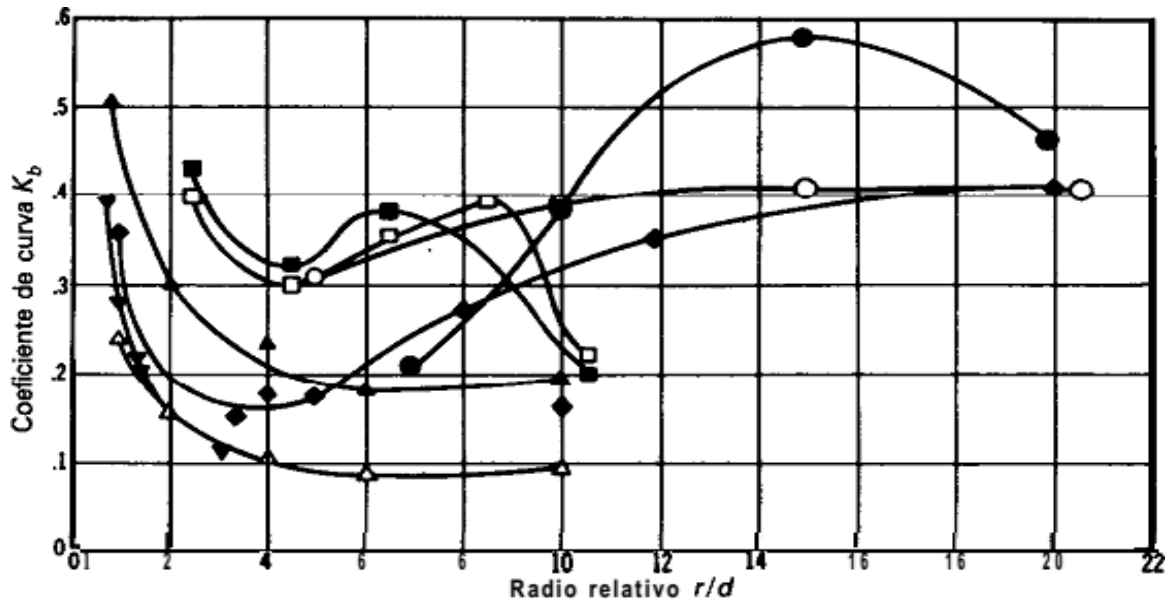


Figura 5. Coeficientes de curva deducidos por varios investigadores.

Nota. Adaptado de: "Pressure Losses for Fluid Flow in 90° Pipe Bends" de K.H. Beiji.

Investigador	Diámetro en pulgadas	Símbolo	Diámetro en mm
Balch	3	●	80
Davis	2	□	50
Brightmore	3	◐	80
Brightmore	4	◑	100
Hofmann	1 . 7 (tubería rugosa)	▲	43 (tubería rugosa)
Hofmann	1 . 7 (tubería lisa)	△	43 (tubería lisa)
Vogel	6, 8 y 10 . .	▼	150, 200, 250
B e i j	4	◆	100

Figura 6. Flujo secundario en curvas.

Nota. Adaptado de: "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, división de ingeniería de Crane. McGraw-Hill.

1.5.4.1 Curvas y codos de 90" con bridas o con extremos para soldar a tope



Figura 7. Codo de 90".

Nota. Adaptado de: Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, división de ingeniería de Crane. McGraw-Hill. Página A49.

Tabla 1.

Coefficiente de resistencia K, según su r/d

r/d	K	r/d	K
1	20	8	24
1.5	14	10	30
2	12	12	34
3	12	14	38
4	14	16	42
6	17	20	50

El coeficiente de resistencia K_n , para curvas que no sean de 90" puede determinarse con la fórmula:

$$K_n = (n - 1)(0,25K_{90} + 0,5K) + K$$

n = número de curvas de 90".

K = coeficiente de resistencia para una curva de 90". (según tabla anterior).

La pérdida ocasionada por la longitud, en términos de K es igual a la longitud desarrollada de la curva, en diámetros de tubería, multiplicada por el factor de fricción f , descrito y tabulado como se muestra a continuación:

$$K_{\text{desarrollada}} = 0,5 * f * \frac{L}{d}$$

1.5.4.2 Resistencia de curvas para tubos en escuadra o falsa escuadra Las longitudes equivalentes de las curvas de este tipo también se muestran a continuación, basadas en los trabajos de H. Kirchbach.

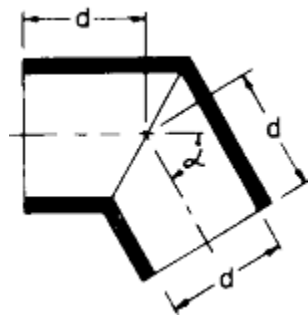


Figura 8. Tubos en escuadra.

Nota. Adaptado de: Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, división de ingeniería de Crane. McGraw-Hill. Página A49.

Tabla 2.

Coeficiente de resistencia, según su ángulo α .

α	K
0°	$2f \frac{L}{d}$
15°	$4f \frac{L}{d}$
30°	$8f \frac{L}{d}$
45°	$15f \frac{L}{d}$
60°	$25f \frac{L}{d}$

θ	K
75°	40 $\frac{1}{2}$
90°	60 $\frac{1}{2}$

1.6 Flujo en completamiento

1.6.1 Perforados Los pozos están revestidos con una tubería cementada, la cual hay que perforar para comunicar el yacimiento con el pozo. Las técnicas actuales para el cañoneo usan cargas explosivas con diámetros entre 0,30 y 0,75 pulgadas. Estas caras están construidas por una envoltura de acero, dentro de la cual hay un cono de metal blando y entre la envoltura y el cono está el explosivo, que al detonar funde el metal blando y dirige un chorro de energía y metal fundido hacia el revestidor y la formación. Este chorro de energía no destruye la materia si no que la comprime.

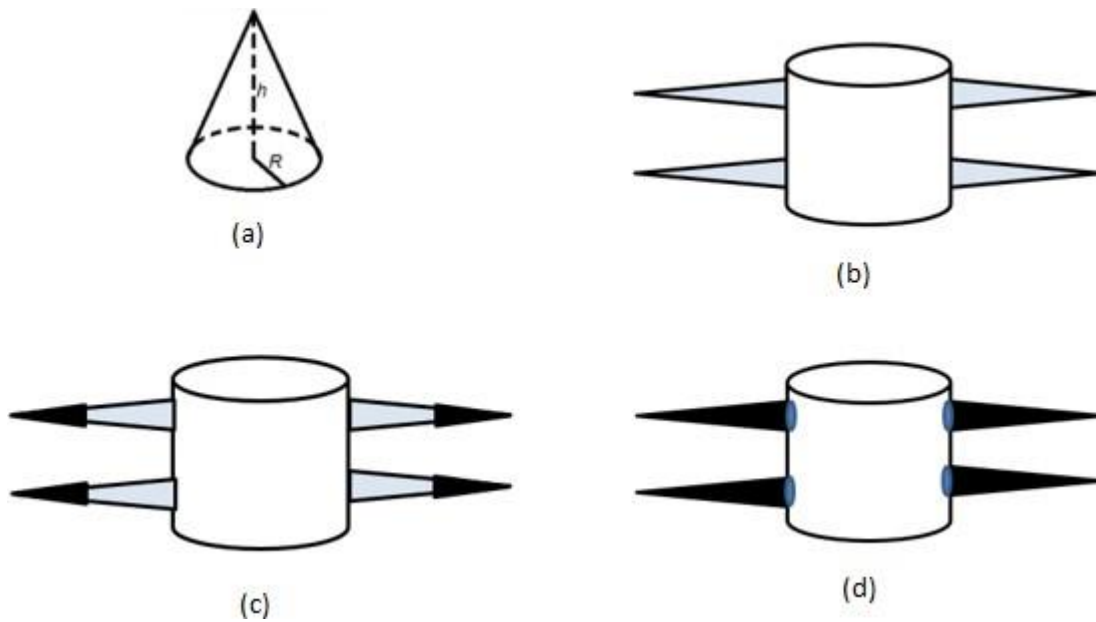
Al crearse estas conexiones de yacimiento y pozo, tiene como figura geométrica equivalente un cono con el cual se pueden comparar las áreas por donde fluye la solución polimérica al pasar por esta sección de completamiento. Cuando los perforados están al 100 % se tiene que el área por donde atravesaría la solución polimérica será por las paredes de un cono que se expresaría de la siguiente manera. Figura 9 (b)

$$A_{\text{conos}} = \pi * r * \sqrt{r^2 + h^2}$$

Estos perforados a través del tiempo se van deteriorando, y se colapsan poco a poco. A esto se le llama perforados parcialmente colapsados y se calcula el área transversal de flujo de la misma forma que los anteriores solo con la diferencia que cambiará la profundidad de penetración de los perforados. Figura 9 (c)

$$A_{\text{perforados}} = A * \sqrt{R^2 + (h * \frac{100 - \% \text{perforados}}{100})^2}$$

En un momento, estos perforados se colapsan totalmente reduciendo su área de flujo a solamente a la base del cono con el cual se representan. Figura 9 (d)



$$A_{\text{perforados}} = A * R^2$$

Figura 9. Tipos de perforados en un pozo. (a) representa las dimensiones de un cono, (b) representa los perforados al 100%, (c) representa perforados parcialmente colapsados, (d) representa perforados completamente colapsados

1.62 Completamiento hueco abierto con Slotted liner Cuando se ha implementado el completamiento a hueco abierto, normalmente se produce migración de finos en el pozo debido a que no hay un filtro que detenga las arenas que produce el yacimiento, para esto se configura con un slotted liner que consta de un liner que tiene muchas ranuras, las cuales sirven como contacto

entre el pozo y el yacimiento, pero que al mismo tiempo es un filtro que no deja pasar estos finos. Al tener configurado un completamiento de esta manera el área por la cual la solución polimérica debe atravesar, está dada por el fabricante del liner. Esta área es conocida como “Open Área” que regularmente está dada en porcentaje. Para poder calcular esta área total por donde fluye el polímero, se calcula a partir del área superficial de las paredes de un cilindro, esta área correspondería al área de la cara de pozo, multiplicándola por el porcentaje del “Open Área”, que sería finalmente el área de inyección por donde fluiría la solución.

$$A_{\text{superficial}} = 2\pi r h$$

$$A_{\text{open}} = A_{\text{superficial}} * \text{Open Área} \%$$

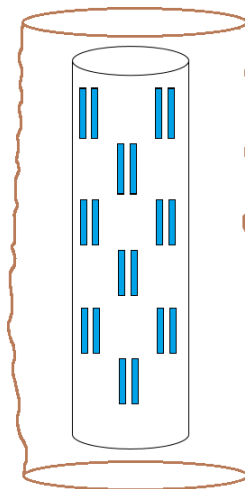


Figura 10. Representación gráfica de pozo a hueco abierto con slotted liner.

1.63 Yacimiento fracturado Se considera el flujo a través de las zonas laterales de la fractura.

Se suponen dos fracturas como lo muestra la figura, las cuales abarcan el total de la longitud completada y su penetración viene dada por la longitud media de fractura.

$$Q_{fractura} = 2 * Q_{tuberia} + 2 * Q_{completamiento}$$

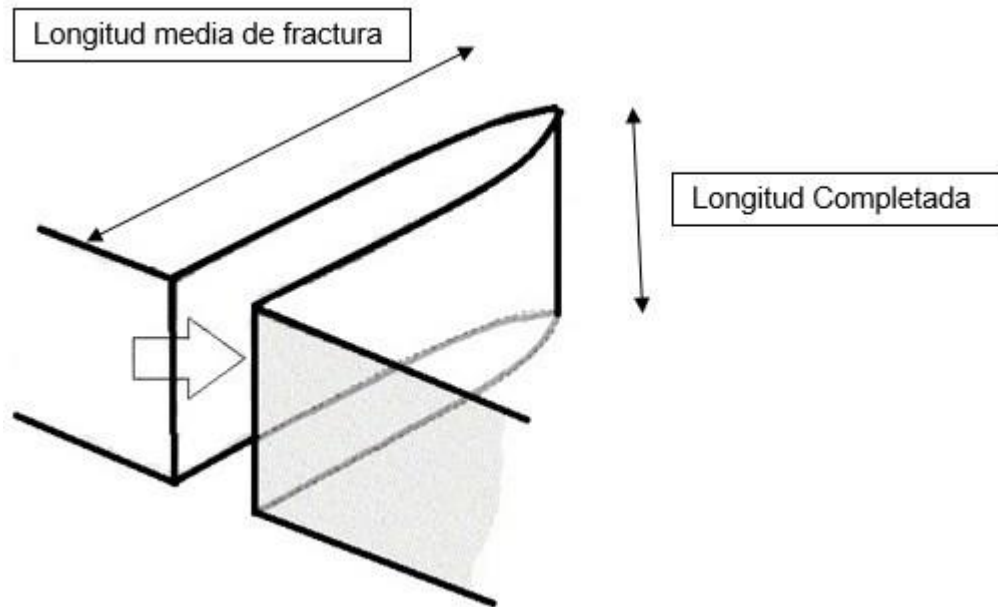


Figura 11. Yacimiento fracturado. Representación gráfica del área por donde fluye la solución polimérica en un yacimiento fracturado.

2. Parámetros en el flujo por accesorios, tubería, tubing y completamiento, relacionados con la degradación mecánica.

2.1 Velocidad del fluido

Cambia de cero en la superficie debido a la condición de no-deslizamiento hasta un máximo en el centro de la tubería. En el flujo de fluidos es conveniente trabajar con una velocidad promedio

ρ , que permanece constante en flujo incompresible cuando el área de la sección transversal de la tubería es constante (Cengel Yunus & Cimbala, 2006)

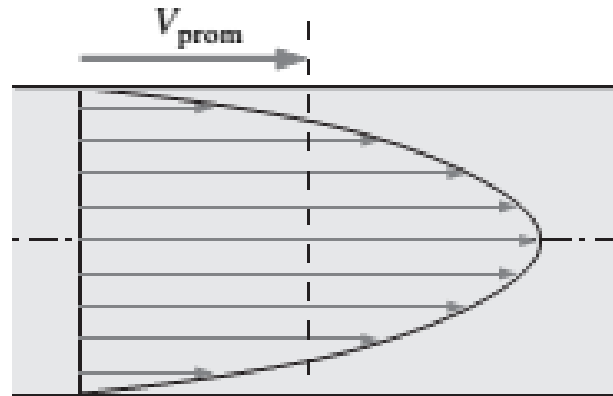


Figura 12. Velocidad de flujo promedio.

Nota. Adaptado de: Cengel Yunus A, Cimbala John M, (2006) Mecánica de fluidos, Fundamentos y aplicaciones.

La degradación mecánica ocurre a una velocidad crítica que se incrementa como una función del diámetro de la tubería. Si esta velocidad no es alcanzada, entonces no existen límites en la distancia sobre la que la solución polimérica pueda ser transportada. Cuando se diseña un proyecto de inyección de polímeros, el diseño de la red de tubería para la inyección de polímeros puede ser un aspecto serio económicamente si el proceso de la disolución de polímeros se da lejos de los pozos de inyección. Para inyección terciaria de polímeros, es un problema la adaptabilidad para el transporte de polímeros en la red de tuberías existentes, inicialmente diseñadas para agua. Las reglas del dedo gordo proponen distancias menores a 10 km y velocidades máximas de 1,5 m/s para evitar que el fluido se someta a una degradación significativa (Jouenne, Anfray, Cordelier, Mateen, & Levitt, 2014).

La tasa de cizallamiento para un tubo circular de radio R está dada por la siguiente expresión:

$$\dot{\gamma} = \frac{4U}{R}$$

Donde U es la velocidad promedio, Si el fluido fluye a grandes velocidades se tendrá una mayor tasa de cizallamiento de la solución polimérica (Hashmi, y otros, 2013).

2.2 Diámetro de la tubería

La tasa de cizallamiento para un tubo circular de radio R está dada por

$$\dot{\gamma} = \frac{4U}{R^3}$$

Si el diámetro de la tubería se incrementa, habría menos cizallamiento debido a la fricción ejercida por la pared interna de la tubería en el fluido circulante. La expresión anterior muestra que a mayor radio menor tasa de cizalla.

Según el experimento ilustrado en el artículo Degradation (Or Lack Thereof) and Drag Reduction of HPAM During Transport in Pipelines SPE 169699-MS En cada test la solución stock fue muestreada en el tanque donde la solución diluida fue almacenada en orden para tener la viscosidad de la solución no degradada. Luego, la solución fue muestreada cuando fluye a la entrada del bucle (punto de muestreo A, L=0 m), después de 1 metro (punto de muestreo B), después de 11 metros (punto de muestreo C) y después de 61 metros (punto de muestreo D). Para cada tubería, la degradación en cada localidad de muestreo es graficada como una función de la velocidad del fluido en la siguiente figura. Solamente los resultados en la solución polimérica de 1.200 ppm son presentados.

- Para la tubería de ID= 0,49", no existe degradación por encima de los 2,3 m/s sin importar la distancia. Para velocidades mayores, hay una gran degradación en el primer metro y

luego, no hay degradación sobre los siguientes 60 metros excepto para el experimento a 9 m/s para los que existe una pequeña degradación adicional debido al transporte en flujo turbulento.

- Para la tubería de ID= 0,55", la degradación a la entrada es muy baja. Esta se incrementa con la distancia. Esto significa que existe una degradación adicional debido al flujo turbulento.
- Para la tubería de ID=0,74", existe una pequeña degradación a la entrada especialmente a 6 m/s. Esto muestra que existe una muy pequeña degradación adicional con la distancia transportada sobre la tubería. Sin embargo, las degradaciones medidas son muy pequeñas y su evaluación puede ser errónea debido a la sensibilidad del viscosímetro.
- Para la tubería de ID= 0,98", no existe una degradación sin importar la distancia a tasas de flujo por encima de 4 m/s, que es la tasa de flujo mayor que podría ser alcanzada con bombas disponibles.

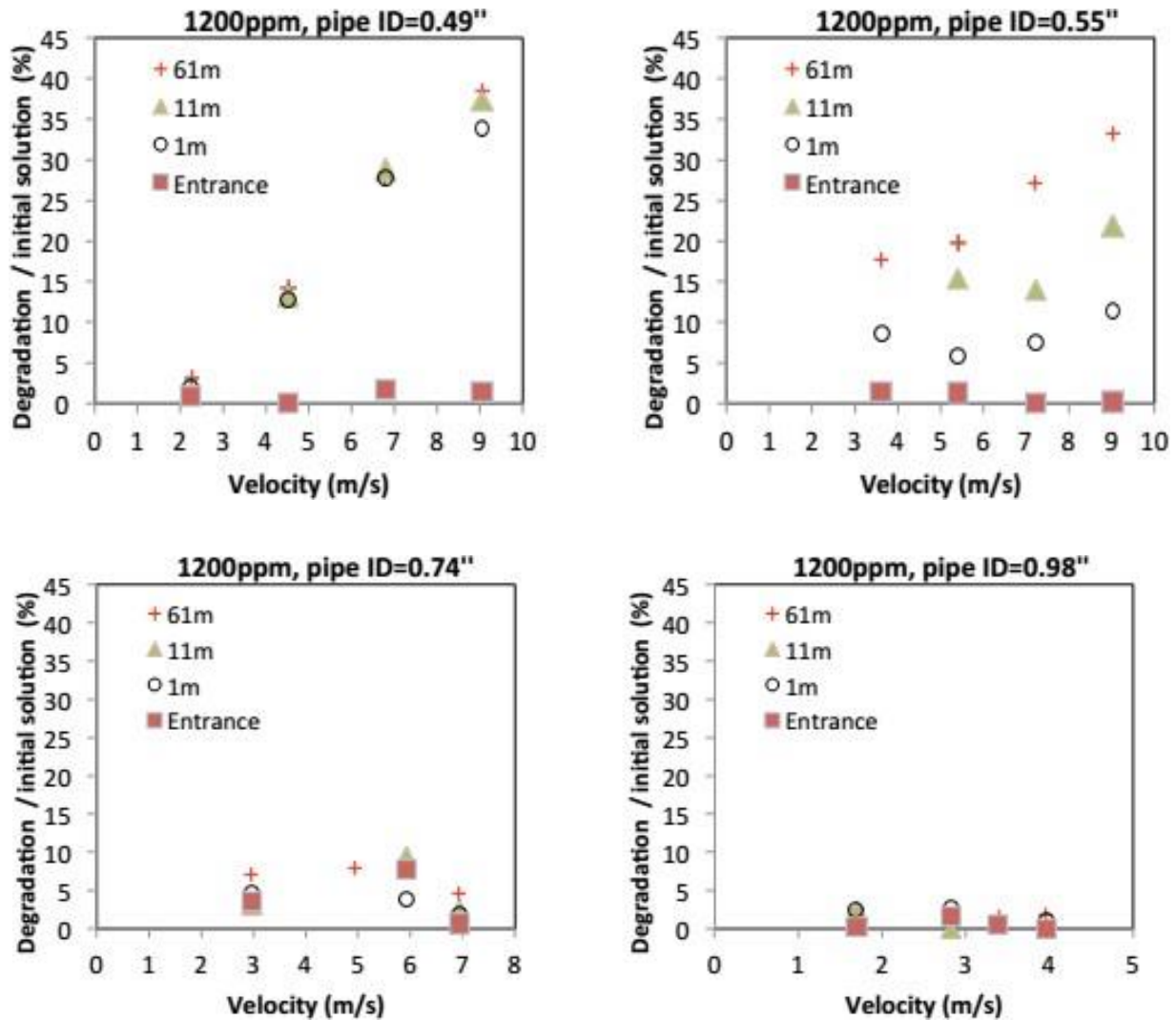


Figura 13. Experimentos a pequeña escala con solución polimérica de 1200 ppm. Cada gráfica representa la degradación de la solución muestreada en cada localidad de muestra como una función de la velocidad de fluido en el tubing. La degradación está relacionada a la viscosidad de la solución stock. Las mediciones de viscosidad fueron desarrolladas a $73\text{ }^{\circ}\text{F}^{-1}$

Nota. Adaptado de: Stéphane Jouenne, (2014) Degradation (or Lack Thereof) and Drag Reduction of HPAM During Transport in Pipelines.SPE-169699-MS. March 31 to April 2, 2014.

2.3 Factor de fricción

La ecuación general de la pérdida de presión, conocida como la fórmula de Darcy y que se expresa

en metros de fluido, es
$$h_f = \frac{f L v^2}{2g D}$$

Esta fórmula puede deducirse por análisis dimensional con la excepción del factor de fricción f , que debe ser determinado experimentalmente. El factor de fricción para condiciones de flujo laminar ($Re < 2.000$) es función sólo del número de Reynolds; mientras que para el flujo turbulento ($Re > 4.000$) es también función del tipo de pared de la tubería.

La región que se conoce como la “zona crítica” aparece entre los números de Reynolds de 2.000 a 4.000. En esta región el flujo puede ser tanto laminar como turbulento, dependiendo de varios factores; éstos incluyen cambios de sección, de dirección del flujo y obstrucciones tales como válvulas corrientes arriba de la zona considerada. El factor de fricción en esta región es indeterminado y tiene límites más bajos si el flujo es laminar y más altos si el flujo es turbulento.

Para números de Reynolds superiores a 4.000, las condiciones de flujo vuelven a ser más estables y pueden establecerse factores de rozamiento definitivos. Esto es importante, ya que permite al ingeniero determinar las características del flujo de cualquier fluido que se mueva por una tubería, suponiendo conocidas la viscosidad y la densidad en las condiciones del flujo. Por esta razón la ecuación $\Delta h = \frac{f L v^2}{2g D}$ se recomienda con preferencia sobre algunas de las ecuaciones empíricas usadas normalmente para el agua, petróleo y otros líquidos.

Si el flujo es laminar ($Re < 2.000$), el factor de fricción puede determinarse a partir de la ecuación:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64 \mu}{\rho v D}$$

Cuando el flujo es turbulento ($Re > 4.000$) el factor de fricción depende no sólo del número de Reynolds, sino también de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería, $\frac{\epsilon}{d}$, es decir, la rugosidad de las paredes de la tubería (ϵ) comparada con el diámetro de la tubería (d). Para tuberías muy lisas, como las de latón extruido o vidrio, el factor de fricción disminuye más rápidamente con el aumento del número de Reynolds, que para tuberías con paredes más rugosas.

La información más útil y universalmente aceptada sobre factores de fricción que se utiliza en la fórmula de Darcy, la presentó L.F Moody. (ver libro Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, división de ingeniería de Crane. McGraw-Hill. páginas A41-A44).

2.4 Concentración polimérica

El fenómeno de reducción de fricción fue descrito por Toms (1948) y Mysels (1949). Ellos mostraron que la adición de cantidades mínimas de largas cadenas poliméricas decrece la caída de presión en una tubería una tasa de flujo dada. Por esto a mayor concentración polimérica habría mayor degradación mecánica provocada por fuerzas friccionales en el interior de la tubería. Cuando las cadenas poliméricas se alargan pueden dar lugar a la ruptura de la cadena y esto haría disminuir el efecto de la reducción de fricción.

Los resultados del experimento a escala piloto (RMOTC Flow loop, Casper, Wyoming, USA): pipe with internal diameter of 6", 7 km long.) que se describe en el artículo de STÉPHANE JOUENNE, Degradation (or Lack Thereof) and Drag Reduction of HPAM During Transport in Pipelines. TOTAL. SPE-169699-MS se muestran en la figura 14. Si la degradación mecánica ocurre bajo flujo turbulento, esta debería incrementarse con la velocidad del fluido. Por esta razón, nosotros solo presentamos los resultados a altas tasas de flujo probadas ($242 \text{ m}^3/\text{h}$), que

corresponde a una velocidad de 3,7 m/s. La viscosidad como una función de la distancia transportada sobre la tubería a 240 m³/h es graficada para cada concentración de polímero en la siguiente figura. Sin importar la concentración, la viscosidad es estable a través de todo el bucle. Los resultados fueron similares a bajas tasas de flujo. Como una conclusión, no existe degradación para velocidades iguales o menores que 3,7 m/s en la tubería de 6" sin importar la concentración de polímero en el rango de 300-2.000 ppm.

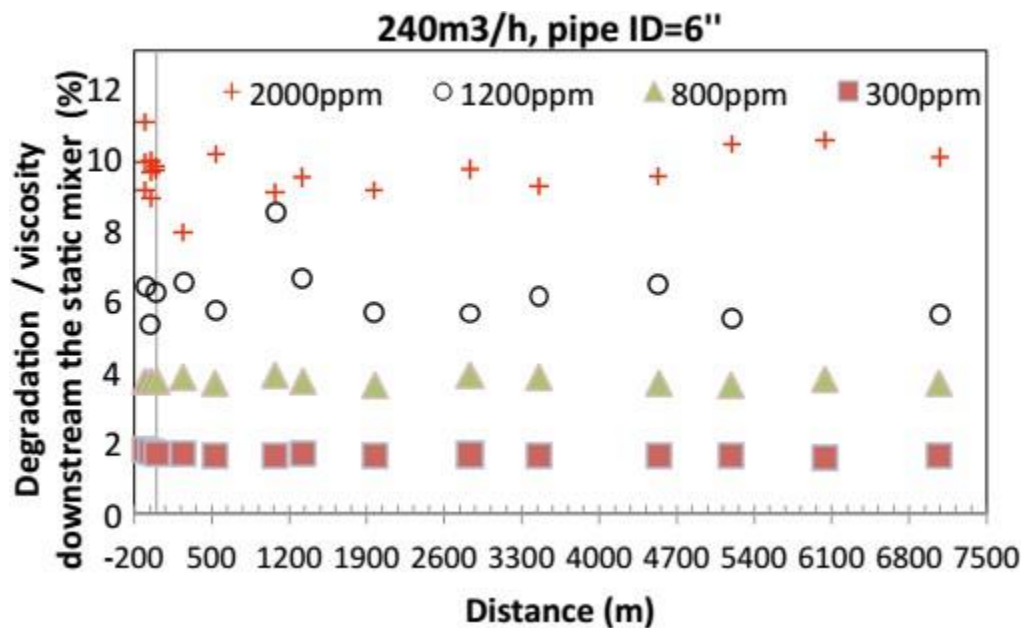


Figura 14. Degradación vs Distancia.

Nota. Adaptado de: Stéphane Jouenne, Degradation (or Lack Thereof) and Drag Reduction of HPAM During Transport in Pipelines.SPE-169699-MS. Pilot scale experiments on the 6" pipe. Viscosity as a function of distance travelled over the loop for each polymer concentration. Viscosity measurements were performed at 73 s⁻¹ at the same temperature as the flow experiment (-50°C).

A concentraciones de 2.000 ppm se presentan porcentajes de degradación de 8 a 11 % y concentraciones de 800 ppm y 300 ppm muestra porcentajes de 4 y 2% respectivamente.

2.5 Peso molecular del polímero

Un incremento en el peso molecular del polímero induce a una mayor sensibilidad al cizallamiento. Esto es consistente con el hecho de que a una macromolécula en espiral más grande se espera a que se alargue más bajo el mismo régimen de deformación. Desde que la fuerza de fricción ejercida en la cadena del polímero es proporcional a la longitud de la macromolécula, la intensidad del cizallamiento se incrementa y puede romper más fácilmente el enlace carbón-carbón de la cadena polimérica (Zaitoun, 2011)

2.6 Tasa de cizalla

Las cadenas poliméricas en solución pueden ser irreversiblemente degradadas a través de la escisión de la cadena y/o reformación estructural mediante el mecanismo mecánico. El resultado es la pérdida en la energía viscosificante del polímero, afectando la inyección de polímeros. La degradación inicial del polímero se debe a la degradación mecánica como el resultado del flujo de la solución polimérica a través de bombas, líneas de flujo, choques, válvulas y el flujo en la formación de la roca y en la cara de pozo.

Estas restricciones de flujo pueden inducir esfuerzos muy altos a lo largo de la cadena principal que resultaría en el rompimiento de la cadena. Se ha encontrado que el polímero experimentó más de 65% de pérdida de la viscosidad inicial al fluir desde los inyectores a los productores.

La tasa de cizalla a través de una tubería convencional de $2\frac{7}{8}$ puede estar en el rango de 100-500 s^{-1} . Por otra parte, shear rates en el rango de 5.000-15.000 s^{-1} . Pueden existir en coiled tubing y en cara de pozo en pozos verticales. Condiciones de altos valores de tasa de cizalla son

encontradas en choques o válvulas bajo altos diferenciales de presiones, que pueden estar en el rango de 50.000 y 100.000 s^{-1} .

La tasa de cizalla ($\dot{\gamma}$) para un tubo circular de radio R puede ser calculada usando la siguiente ecuación:

$$\dot{\gamma} = \frac{4U}{R} = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

Donde U es la velocidad promedio, m/s y Q es el flujo volumétrico, m^3/s .

Se tienen mayores tasas de cizalla en flujos a altos caudales y en tuberías de menor diámetro.

2.7 Flujo de cizallamiento constante de polímeros inelásticos y viscoelásticos

Se habla de flujo con cizallamiento simple en régimen laminar dentro de un capilar lejos de los extremos. Se asume que un esfuerzo promedio y una tasa de tensión para un flujo dado de un fluido a través del capilar pueden ser definidos. Se sabe que la viscosidad puede ser constante o en función de la tasa de cizalla. Esta situación es mostrada para un número de diferentes tipos de fluido en la figura, la cual muestra diferentes relaciones entre el esfuerzo cortante y la tasa de cizalla.

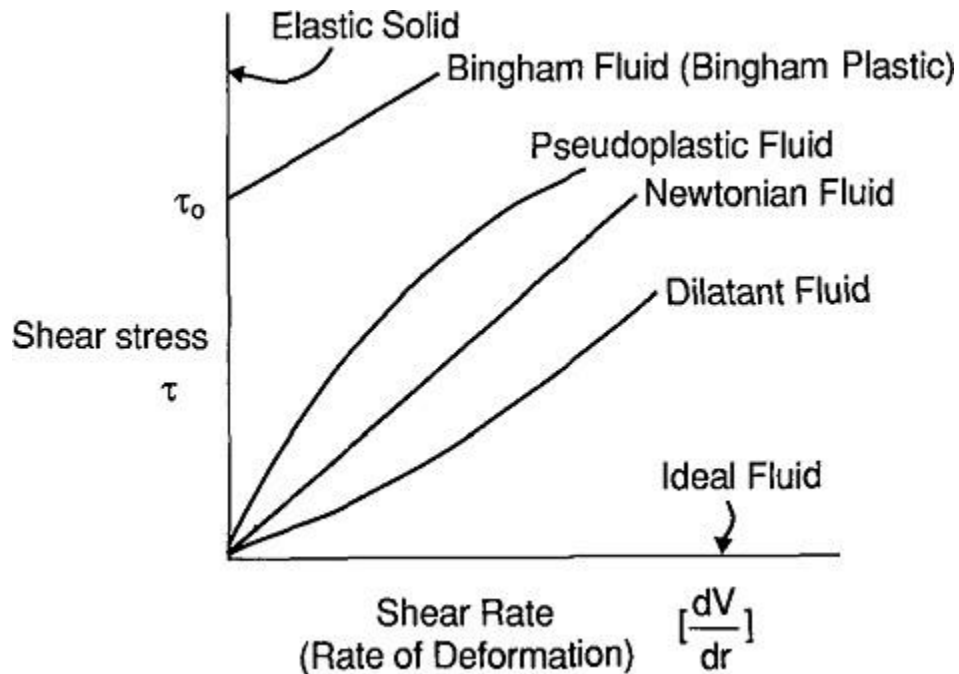


Figura 15. Diferentes tipos de comportamiento esfuerzo de cizalla/ tasa de cizalla se encontró en los fluidos poliméricos; también se muestran los casos de sólido elástico y fluido ideal.

Nota. Adaptado de: Sorbie.K. S, Phil, D. Polymer-Improved Oil Recovery, reader in petroleum engineering, department of petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh.

Los casos en los que la pendiente es una constante corresponden a fluidos newtonianos; entre más empinada sea la línea el fluido es más viscoso. Los casos que muestran una pendiente pequeña a medida que aumenta la cizalla son conocidos como adelgazamiento por cizalladura o fluidos pseudoplásticos. En un simple flujo de cizalla, la mayoría de soluciones poliméricas son pseudoplásticas por naturaleza. Los fluidos que muestran un incremento en la viscosidad aparente (incremento de la pendiente) se conocen como espesamiento por cizallamiento o fluidos dilatantes.

También existe un tipo de fluido que muestra un comportamiento tipo plástico, este es conocido como plástico de Bingham y su comportamiento inicial es como el de un sólido tal que, cuando un esfuerzo es aplicado, inmediatamente no fluye a menos que el esfuerzo sea más grande que el estrés mínimo de rendimiento, τ_0 , como se muestra en la figura anterior.

Las soluciones poliméricas son generalmente pseudoplásticas (espesamiento por cizalla), y una forma simple de graficar este comportamiento reológico es la viscosidad contra tasa de cizalla. Estas soluciones poliméricas muestran comportamiento Newtoniano a tasas de flujo suficientemente bajas, seguidas por una región de adelgazamiento por cizalla donde la viscosidad del fluido decrece. A tasas de cizalla muy altas, que no son mostrados en estas figuras, la tendencia es para la viscosidad a aproximarse a una segunda platea con valor justo por encima de la viscosidad del solvente. η_0 es referido a un valor de viscosidad en la platea Newtoniana a bajo shear rate de la viscosidad, y η_∞ al valor de la viscosidad en la platea Newtoniana a alto shear rate.

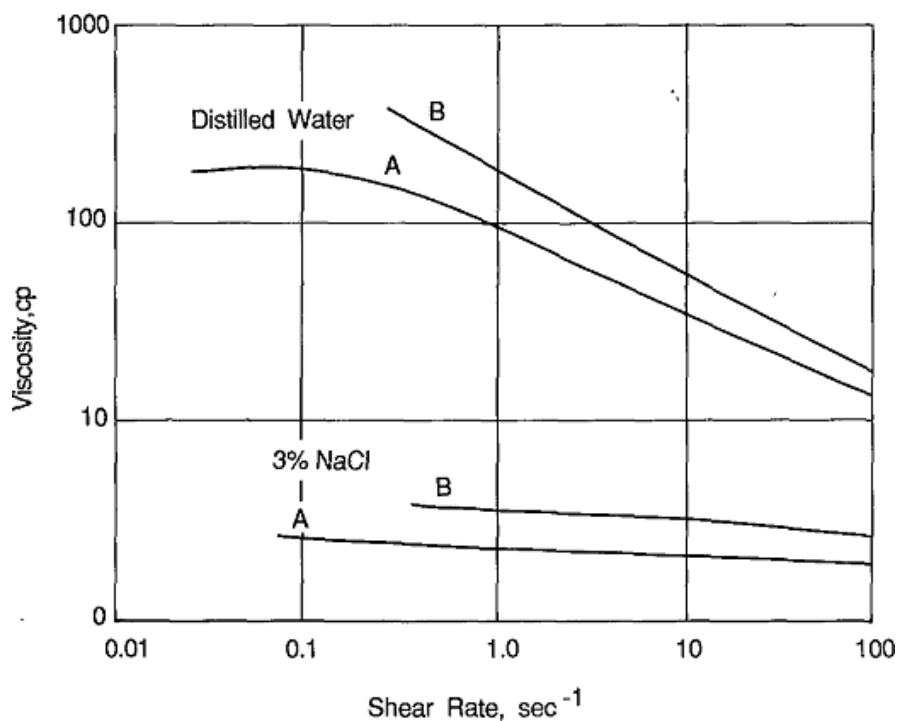


Figura 16. El comportamiento de la viscosidad vs tasa de cizalla de una solución HPAM mostrando los efectos de la salinidad y el peso molecular (temperatura local): pesos moleculares de $A= 3 \times 10^6$ y $B = 5.5 \times 10^6$.

Nota. Adaptado de: Sorbie.K. S, Phil, D. Polymer-Improved Oil Recovery, reader in petroleum engineering, department of petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh.

2.7.1 Polímeros inelásticos (Modelos reológicos) Varios modelos empíricos han sido propuestos para describir la forma funcional de $\eta(\dot{\gamma})$ en una o más de estas regiones. Algunas de estas formas empíricas son resumidas a continuación:

Sin duda, la forma analítica más común encontrada de la relación viscosidad- tasa de cizalla es el modelo de la ley de energía (Bird et al., 1960) que describe la región pseudoplásticas. El modelo de la ley de energía es algunas veces llamado la ley de Ostwald & Waele y es dada por la expresión:

$$\eta(\dot{\gamma}) = K \dot{\gamma}^{n-1}$$

Donde K y n son constantes. En la región pseudoplásticas $n < 1$ (típicamente $n=0.4 - 0.7$). Para un fluido newtoniano $n=1$ y K es simplemente la viscosidad constante, μ . Aunque la ecuación anterior es bastante satisfactoria para describir la región pseudoplásticas, esto es inadecuado a altos y bajas tasas de cizalla.

Un modelo más satisfactorio para estos rangos de tasas de cizalla es la ecuación de Carreau. Aquí la función de viscosidad es dada por:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{-\frac{n-1}{2}}$$

Donde el significado de las constantes η_{∞} , η_0 , λ y n es explicado en a continuación.

- **Ley de Energía**

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1}$$

Constantes:

K= constante (cp $\dot{\gamma}^{n-1}$), que es equivalente a la viscosidad Newtoniana cuando $\dot{\gamma} \rightarrow 1$.

n= constante adimensional, típicamente en el rango de $0.4 \leq n \leq 1.0$ para fluidos pseudoplásticas.

Comentarios:

1. Esto es matemáticamente la forma más simple de $\eta(\dot{\gamma})$ disponible.

2. Comportamiento insatisfactorio de este modelo a muy baja y alta tasa de cizalla. Figura 17

(a)

3. $n < 1$ describe el fluido pseudoplástico; $n > 1$ describe el fluido dilatante.

• **Modelo Eyring Kincaid**

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} \right)^{-n}$$

Constantes:

τ_0 = Es un tiempo característico.

τ_0 = Es un stress característico.

Comentarios:

1. Originalmente derivado de la teoría de tasa de procesos.
2. Extensión empírica al modelo de Powell-Eyring.

• **Modelo Ellis Bird**

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \tau_1 + \left(\frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} \right)^n$$

Constantes

τ_0 = viscosidad a shear rate cero.

τ_1 = valor de shear stress a $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1$

n = Constante adimensional.

Comentarios:

1. El modelo de Ellis es expresado en términos de los esfuerzos de cizalla, τ , mejor que el shear rate, $\dot{\gamma}$, figura 17(b)
2. α en este modelo es equivalente a $1/n$ en el modelo de la ley de energía.
3. Debido a la forma simple varios resultados analíticos disponibles para el modelo de Ellis.

• **Modelo Carreau**

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left[1 + \frac{(\eta_0 - \eta) \dot{\gamma}^2}{\tau_0^2} \right]^{-\alpha}$$

Constantes:

η_0 = Viscosidad a shear rate cero.

η_{∞} = Viscosidad a un valor infinito de shear rate.

τ_0 = una constante de tiempo.

α = el mismo al índice de la ley de energía.

Comentarios:

1. Modelo de Carreau provee una muy buena gama completa de η se ajusta para varios sistemas de polímeros. Figura 17(c)
2. η_{∞} es a menudo tomada como una viscosidad de solvente, región no dilatante.
3. Esto es un modelo de 4 parámetros comparado con el modelo de energía más simple de 2 parámetros.

• **Bingham**

$$\eta = \infty \quad \tau < \tau_0$$

$$\eta = \tau_0 + \frac{\eta_0 \tau}{\tau_0} \quad \tau \geq \tau_0$$

Constantes:

τ_0 = Estrés de fluencia por debajo del cual no se produce movimiento.

μ_0 = Constante con dimensiones de viscosidad.

Comentarios:

1. Usado principalmente para pastas, slurries y lodos de perforación, que son conocidos como “Plásticos de Bingham”.

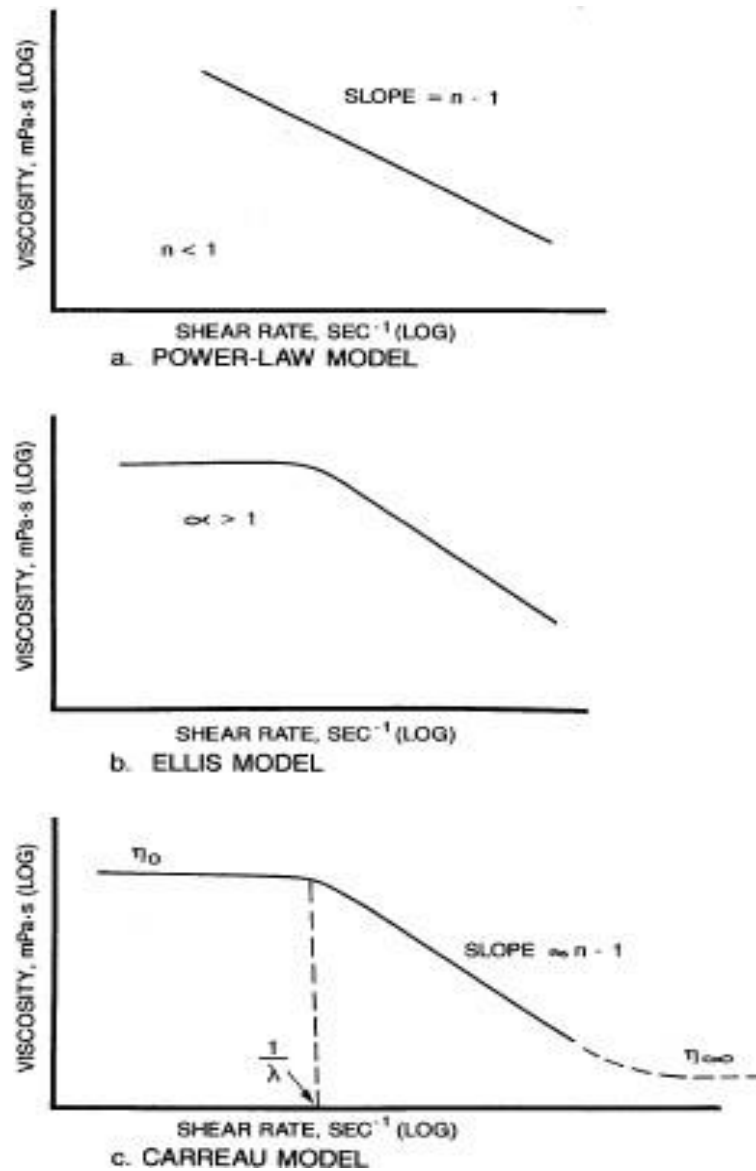


Figura 17. Modelos reológicos.

Nota. Adaptado de: Instituto Americano del Petróleo. Prácticas recomendadas para la evaluación de polímeros usados en operaciones de Recobro Mejorado. Práctica 63 (RP 63). 1220 L Street, Northwest Washington DC 20005, first edition June 1, 1990. Figura 3-4.

2.7.2 Polímeros viscoelásticos Los fluidos que muestran una viscosidad dependiente a la cizalla, mencionados anteriormente, son asumidos como inelásticos, a pesar de que algunas soluciones poliméricas muestran algún grado de elasticidad. Cuando los materiales son

deformados a través de un pequeño desplazamiento, estos tienden a regresar a su configuración original. Si un esfuerzo de cizalla es aplicado a un sólido ideal, entonces para desplazamientos pequeños el desplazamiento, que es el esfuerzo, τ , es proporcional a la tensión aplicada y la ley de Hooke es válida, así que:

$$\tau = G' \gamma$$

Donde G' es el módulo elástico del material. Note que el comportamiento elástico es asociado con la memoria del material en que tenderá a hacer que el material regrese a su configuración original.

3. Correlaciones de ecuaciones de flujo usadas para calcular la perdida de viscosidad en tubería, accesorios, tubing y perforados.

La viscosidad depende de la tasa de cizalla con la que se ve influenciado el fluido polimérico al transportarse por tubería y fluya a través de los distintos accesorios que se van a contemplar en el presente trabajo de grado que son codos, válvulas de compuerta y de obturador. La tasa de cizalla depende de dos variables que son el caudal con el que es transportada la solución polimérica al interior del sistema de transporte y el radio de la sección de área transversal por la que fluye.

Cuando se tiene un estado de la solución polimérica fluyendo a través de una tubería de sección transversal circular se puede obtener la tasa de cizalla que sufre el fluido ya que se conoce el diámetro de la tubería y el caudal de flujo. En este tipo de configuración se podría correlacionar la pérdida de viscosidad que sufre el fluido cuando sea transportada en dicha tubería. El problema se

presenta cuando se tiene una configuración de transporte con los accesorios (válvulas y codos). Cuando el fluido pase a través de estos va a sufrir una degradación mecánica y la viscosidad se afectará. El éxito del presente trabajo radica en encontrar la forma adecuada de correlacionar las pérdidas de fricción ejercidas por los accesorios con las propiedades reológicas del fluido.

Debido a que se conocen los coeficientes de fricción de los accesorios, el factor de fricción por medio de la rugosidad relativa, el número de Reynolds con el que fluye la solución y la velocidad de flujo, es posible calcular las pérdidas de fricción por accesorios (h_f) dadas en unidades de altura que al multiplicarse por la gravedad y la densidad del fluido se obtienen las pérdidas de presión (ΔP) provocadas por la fricción que ejercen los accesorios del sistema de transporte en superficie.

La caída de presión friccional para una longitud de tubería depende del coeficiente de factor de fricción, la longitud de dicha tubería, la densidad del fluido, la velocidad de flujo y el diámetro de la tubería relacionados de la siguiente forma:

$$\Delta P = \frac{f L \rho v^2}{2D} \quad (1)$$

Despejando Diámetro de la ecuación

$$D = \frac{f L \rho v^2}{2 \Delta P} \quad (2)$$

La construcción de la correlación inicia igualando las pérdidas de presión debido a accesorios con la caída de presión para una longitud de tubería descrita en la anterior expresión. De esta forma se podría construir con una geometría de flujo nueva basada en una tubería con la longitud de la tubería configurada y diámetro calculado en (2) de tal forma que cause la misma pérdida de presión como la que produce los accesorios implementados. A partir de las nuevas dimensiones de tubería creadas y con el caudal del flujo conocido se calcula la tasa de cizalla que produce esta geometría en el fluido transportado y a partir de este valor de tasa de cizalla se podría conocer la viscosidad del fluido.

Las pérdidas Totales de viscosidad están conformadas por un 10% que ocurren en el sistema de transporte en superficie (incluye la tubería configurada y los accesorios) y el 90% en el sistema de perforados del pozo inyector de polímeros.

Se esperan tasas de cizalla totales de entre 30.000 y 40.000 s^{-1} generado desde las bombas de las facilidades de inyección hasta las perforaciones de los pozos de inyección (Castro-García, y otros).

La viscosidad se halla a partir de la gráfica, que se encuentra en la figura 18 (Prueba realizada en laboratorio para el polímero FP-3230S)

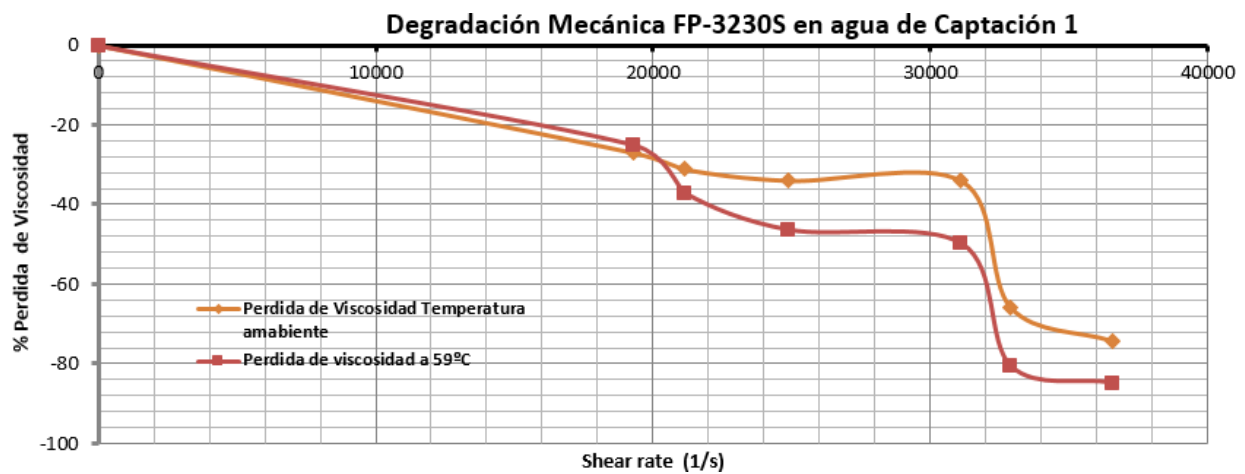


Figura 18. Pérdida de viscosidad vs Tasa de cizalla, prueba de laboratorio FP-3230S

Adaptado de: Evaluación experimental PF Laboratorio química de producción, Laboratorio Recobro mejorado. Ecopetrol.

De esta forma se consigue que a partir de los datos de tasa de cizalla producidos en el sistema configurado se logre encontrar la pérdida de viscosidad que muestra la gráfica construida en el laboratorio.

3.1 Cálculo de la tasa de cizalla en tuberías

Para calcular la tasa de cizalla en una sección de tubería en las facilidades de superficie que se tratan en este trabajo de grado, es necesario tener en cuenta el caudal (Q) del fluido polimérico y el Schedule para saber el diámetro interno (D) de la tubería, y calcular la velocidad de flujo con la siguiente expresión:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Luego de tener definida la velocidad de flujo se procede a calcular el número de Reynolds, para poder determinar en qué régimen de flujo está la solución polimérica atravesando cada parte en estudio. Para poder calcular los Reynolds, es necesario saber la viscosidad (μ) del fluido polimérico y su densidad (ρ).

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

A partir de este número de Reynolds se puede determinar en qué régimen de flujo se encuentra, si el flujo es laminar se procede a calcular el factor de fricción con la siguiente expresión.

$$f = \frac{64}{Re}$$

Cuando el flujo está en régimen turbulento es necesario usar la correlación de Colebrooke-White la cual está dada por la siguiente expresión con la cual se debe hacer una serie de iteraciones para poder hallar el factor de fricción (f).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{f}{3.7} \right)$$

Donde, Re es el número de Reynolds y $\frac{\epsilon}{D}$ es la rugosidad relativa que se toma de la tabla de valores de rugosidad equivalentes para tuberías comerciales nuevas, para este caso, tubería de acero comercial.

Material	Rugosidad ϵ	
	ft	mm
Vidrio, plástico	0 (liso)	
Concreto	0.003-0.03	0.9-9
Duela de madera	0.0016	0.5
Hule, alisado	0.000033	0.01
Tubería de cobre o latón	0.000005	0.0015
Hierro fundido	0.00085	0.26
Hierro galvanizado	0.0005	0.15
Hierro forjado	0.00015	0.046
Acero inoxidable	0.000007	0.002
Acero comercial	0.00015	0.045

* La incertidumbre en estos valores puede ser hasta ± 60 por ciento..

Figura 19. Valores rugosidades equivalentes para tuberías nuevas comerciales.

Nota. Adaptado de: Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, división de ingeniería de Crane. Traducción: VALFISA, S.A. Revisión técnica. Clemente Reza García- Ingeniero Químico Industrial, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias extractivas IPN, McGraw-Hill.

Al tener ya el factor de fricción, el siguiente paso a realizar es calcular la pérdida de carga (h_f) en la tubería de la siguiente forma:

$$h_f = \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Donde, L es la longitud de la tubería en estudio, v es la velocidad de flujo de la solución polimérica, D es el diámetro interno y g es la fuerza gravitacional. Al calcular la pérdida de carga en la tubería, el paso a seguir es convertir esta pérdida de carga que esta expresada en metros de fluido a pérdida de presión expresada en Pascales.

$$\Delta P = \rho * g * h_{eq} * h_{f}$$

Donde, ΔP es la pérdida de presión, ρ es la fuerza gravitacional y h_{f} es la pérdida de carga. Al tener ya calculada esta caída de presión, se crea una tubería equivalente en la cual se genere la misma pérdida de presión, pero con un diámetro equivalente, el cual sería usado luego para poder hallar un radio equivalente y por último con este diámetro equivalente calcular la tasa de cizalla que se genera en la tubería cuando la solución polimérica atraviesa la sección de tubería, con la ecuación general de la pérdida de presión

$$\Delta P = \frac{\rho * g * \rho * v^2}{2 * f_{eq}}$$

Despejando f_{eq}

$$f_{eq} = \frac{\rho * g * \rho * v^2}{2 * \Delta P}$$

Donde f es el factor de fricción calculado a partir colebrook-white, L es la longitud de la tubería en estudio, ρ es la densidad de la solución polimérica, v es la velocidad de flujo de este fluido y ΔP es la pérdida de presión. A partir de este diámetro equivalente se calcula el radio equivalente de la siguiente forma

$$\frac{D_{eq}}{D} = \frac{r_{eq}}{r}$$

Por último, ya calculado el radio equivalente, se procede a calcular la tasa de cizalla que se ha generado, cuando la solución polimérica pasa por una sección de tubería con la siguiente formula

$$\dot{\gamma} = \frac{4 * v}{D_{eq}^3}$$

Donde, $\dot{\gamma}$ es el shear rate, v es el flujo de la solución polimérica y r_{eq} es el radio equivalente calculado a partir de la caída de presión en la sección de tubería.

3.2 Cálculo de la tasa de cizalla en accesorios

Para calcular la tasa de cizalla que se genera cuando una solución polimérica está atravesando accesorios como válvulas y codos, se tiene en cuenta el coeficiente de resistencia (K) que tiene cada tipo de accesorio

$$K_{\text{accesorio}} = f_{\text{accesorio}} * K_{\text{tubería}} * L$$

Donde f es el factor de fricción en el accesorio, el cual es hallado al usar la correlación de Colebrooke-white,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{D} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

Donde

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{\epsilon}{D}$$

Donde:

Re es el número de Reynolds, ϵ/D es el factor de rugosidad, ρ y μ son la densidad y la viscosidad relativamente de la solución polimérica, D es el diámetro de la tubería y v es la velocidad de flujo en la tubería configurada. Cuando se ha calculado el coeficiente de resistencia, se calcula la pérdida de carga que se ha generado en el accesorio individualmente con la siguiente fórmula:

$$h_{\text{accesorio}} = K_{\text{accesorio}} * \frac{v^2}{2g}$$

A partir de este momento se procede de igual forma con el procedimiento que se usó en el cálculo de la tasa de cizalla en tubería donde se calcula la pérdida de presión, luego calculando el diámetro equivalente y su radio equivalente, y por último calculando la tasa de cizalla generada en

cada accesorio individualmente. Este proceso esta descrito a continuación, y que ya se había explicado con mayor detalle anteriormente.

$$\Delta P = \mu \cdot \frac{4 \cdot Q \cdot L}{\pi \cdot R^4} \cdot h$$

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot Q \cdot L \cdot \pi \cdot R^2}{2 \cdot \pi \cdot R^4}$$

Despejando Q

$$Q = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot R^4}{4 \cdot \mu \cdot L}$$

$$Q = \frac{\Delta P \cdot R^4}{4 \cdot \mu \cdot L}$$

$$Q = \frac{4 \cdot \mu \cdot L}{\pi \cdot R^4}$$

3.3 Calculo de la tasa de cizalla en cara de pozo

Por último, el fluido polimérico debe pasar por su completamiento para poder por fin entrar al yacimiento y empezar a ejercer la función para la cual fue diseñado. Esta es una de las zonas donde se genera las mayores degradaciones del polímero debido a su alta restricción de flujo.

En esta investigación se ha estudiado los casos de pozo con perforados, hueco abierto con slotted linner y yacimiento fracturado. En este caso estudio se sensibiliza el tipo de cañoneo el cual va desde perforados totalmente colapsados hasta perforados con máxima penetración. La variable más importante que se debe tener en cuenta para poder determinar la pérdida de viscosidad debida a la tasa de cizalla en esta etapa es el área por la cual va a fluir el polímero hacia el yacimiento. Por esto el procedimiento para hallar la tasa de cizalla debe estar basado en el cálculo de esta área.

3.3.1 Completamiento con perforados

3.3.1.1 Perforados completamente colapsados Para poder determinar la tasa de cizalla y a partir de esta poder calcular la viscosidad que se pierde al pasar por este tipo de restricción se tiene que conocer el área de flujo. Se debe calcular esta área a partir del número de disparos que se han hecho en el completamiento, el cual se halla de la siguiente forma:

$$A_{\text{flujo}} = SPM * A_{\text{disparo}}$$

Donde SPM es Shots per meter (disparos por metro). Para perforados completamente colapsados se tiene que el área de flujo es la de un círculo (área de disparo) debido a que no tiene profundidad o penetración (están completamente colapsados), al multiplicar el área de un círculo y ser multiplicado por el número de disparos se tiene el área total de flujo en la cara de pozo.

$$A_{\text{flujo}} = SPM * \left(\frac{\pi * D^2}{4} \right)$$

Donde D es el diámetro del perforado. El siguiente paso es calcular el radio de poro con la correlación utilizada en el artículo de The Role of Adsorption in Polymer Propagation Through Reservoir Rocks donde calculan el diámetro promedio de la garganta poral conociendo la permeabilidad en el yacimiento y la porosidad (Zaitoun & Kohler, pág. 327).

$$r_p = \sqrt{\frac{k * \phi}{\pi}}$$

Donde ϕ es la porosidad y k es la permeabilidad del yacimiento. Ya con el radio de poro se procede a calcular el shear rate generado al pasar el fluido por esta área con la siguiente ecuación:

$$\dot{\gamma} = \frac{v * \phi}{A_{\text{flujo}} * r_p}$$

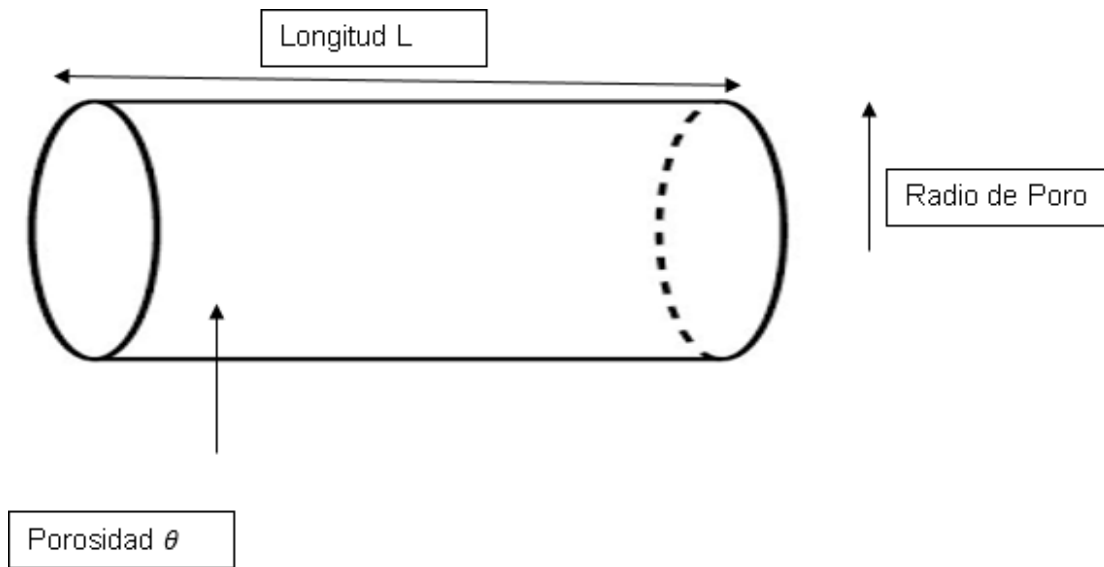


Figura 20. Representación gráfica de un poro por el cual fluye la solución polimérica en el yacimiento.

$$V_{\text{poro}} = V_{\text{total}} \cdot \theta = \pi \cdot R^2 \cdot L \cdot \theta$$

$$R_{\text{poro}} = \sqrt{\frac{V_{\text{poro}}}{\pi \cdot L \cdot \theta}}$$

$$N_{\text{poros}} = \frac{A_{\text{total}} \cdot \theta}{\pi \cdot R_{\text{poro}}^2} = \frac{A_{\text{total}} \cdot \theta}{\pi \cdot \left(\frac{V_{\text{poro}}}{\pi \cdot L \cdot \theta} \right)} = \frac{A_{\text{total}} \cdot \theta^2 \cdot L}{V_{\text{poro}}}$$

$$N_{\text{poros}} = \frac{A_{\text{total}} \cdot \theta^2 \cdot L}{V_{\text{poro}}}$$

El número de poros en la pared de la perforación es el área porosa total dividida por el área de un poro singular:

$$N_{\text{poros}} = \frac{A_{\text{total}} \cdot \theta}{\pi \cdot R_{\text{poro}}^2} = \frac{A_{\text{total}} \cdot \theta}{\pi \cdot \left(\frac{V_{\text{poro}}}{\pi \cdot L \cdot \theta} \right)} = \frac{A_{\text{total}} \cdot \theta^2 \cdot L}{V_{\text{poro}}}$$

para calcular el área por donde atraviesa el fluido, se toma el área superficial de un cono para simular los disparos en las paredes. Primero se calcula el número de disparos en el completamiento.

$$N_{\text{disparos}} = N_{\text{disparos}} * \text{área superficial de un cono}$$

Luego se calcula el área total de los disparos multiplicando la cantidad de disparos por el área superficial de un cono de la siguiente forma:

$$A_{\text{total}} = N_{\text{disparos}} * \pi * \left[\left(\frac{D_{\text{disparo}}}{2} \right)^2 + \left(\frac{H_{\text{disparo}}}{2} \right)^2 \right]$$

Donde D_{disparo} es el diámetro del disparo, H_{disparo} es la profundidad del disparo. Luego se procede a calcular la tasa de cizalla de la forma como anteriormente se demostró.

$$\dot{\gamma} = \frac{V * \theta}{A_{\text{total}} * \sqrt{V * \theta * \theta}}$$

3.3.1.3 Perforados parcialmente colapsados. De la misma forma como se calcula el número total de disparos como anteriormente se halla:

$$N_{\text{disparos}} = N_{\text{disparos}} * \text{área superficial de un cono}$$

Pero para calcular el área total se debe cambiar la profundidad de la penetración de disparo, la cual se puede ver en la siguiente formula:

$$A_{\text{total}} = N_{\text{disparos}} * \pi * \left[\left(\frac{D_{\text{disparo}}}{2} \right)^2 + \left(\frac{H_{\text{disparo}} * (1 - \% \text{colapsado})}{2} \right)^2 + \left(\frac{H_{\text{disparo}} * \% \text{colapsado}}{2} \right)^2 \right]$$

Donde $\% \text{colapsado}$ es el porcentaje colapsado de la profundidad de penetración del disparo.

Luego se procede a calcular la tasa de cizalla de la siguiente forma:

$$\dot{\gamma} = \frac{V * \theta}{A_{\text{total}} * \sqrt{V * \theta * \theta}}$$

3.3.2 Completamiento en hueco abierto Para poder calcular la tasa de cizalla generada en este tipo de completamiento, es necesario calcular el área de flujo, la cual estará definida como el área total del pozo y esta se podría hallar con la siguiente formula:

$$A_{\text{pozo}} = \pi * r_{\text{pozo}}^2 * \frac{2\pi r_{\text{pozo}}^2 \mu_{\text{pozo}}}{\mu_{\text{pozo}}}$$

Donde A_{pozo} es el área del pozo, y r_{pozo} es el diámetro del pozo. Luego se procede a calcular el área de inyección que está definida de la siguiente forma:

$$A_{\text{inyección}} = A_{\text{pozo}} * \frac{\mu_{\text{pozo}}}{\mu_{\text{inyección}}}$$

Por último, se calcula la tasa de cizalla a partir del área de inyección encontrada.

$$\dot{\gamma} = \frac{\mu_{\text{inyección}} * \dot{\gamma}_{\text{inyección}}}{A_{\text{inyección}} * \sqrt{\mu_{\text{pozo}} * \dot{\gamma}_{\text{pozo}} * \mu_{\text{pozo}}}}$$

3.3.3 Yacimiento fracturado Como primera instancia se procede a calcular el área de la fractura la cual es el área por donde va a fluir la solución polimérica y es en esta área en donde se produce la tasa de cizalla al fluir el polímero. Con la siguiente formula se calcula el área de la fractura:

$$A_{\text{fractura}} = \frac{2\pi r_{\text{fractura}} \mu_{\text{fractura}}}{\mu_{\text{fractura}}} * \frac{2\pi r_{\text{fractura}} \mu_{\text{fractura}}}{\mu_{\text{fractura}}}$$

Luego de calcular esta área se procede a calcular la tasa de cizalla generada en la fractura de la siguiente forma:

$$\dot{\gamma} = \frac{\mu_{\text{fractura}} * \dot{\gamma}_{\text{fractura}}}{A_{\text{fractura}} * \sqrt{\mu_{\text{pozo}} * \dot{\gamma}_{\text{pozo}} * \mu_{\text{pozo}}}}$$

3.4 Ejemplos

Ejemplo 1: Se tiene un pozo de 8,6 (pulgadas) de diámetro, en el cual se hizo un completamiento de perforados totalmente colapsados, otro pozo de 9,6 (pulgadas) de diámetro con completamiento con perforados colapsados al 50% y otro de 10,6 (pulgadas) de diámetro con completamiento con perforados con máxima penetración, todos con una longitud de 20 (metros), se cañoneo con 12 disparos por pie, el diámetro del disparo es de 0,450 (pulgadas) y una penetración de 19,95 (pulgadas). Se pretende inyectar una solución polimérica a una tasa de flujo es de 250 (metros cúbicos/día). La formación en la cual se va a inyectar la solución polimérica tiene una porosidad de 30% y una permeabilidad de 1.000 md. Determine la tasa de cizalla generada en la solución polimérica al pasar por los perforados en cada uno de los pozos.

Solución:

1. Pozo con completamiento de perforaciones totalmente colapsadas

- Convertir los disparos por pie a disparos por metro

$$\begin{aligned} \text{Disparos por metro} &= \frac{\text{Disparos por pie}}{3,28084} \\ \text{Disparos por metro} &= 12 \text{ disparos por pie} * \frac{1 \text{ pie}}{3,28084 \text{ metros}} = 39 \end{aligned}$$

- Determinar el número de tiros en el completamiento

$$\text{Número de tiros} = \text{Disparos por metro} * \text{Longitud del pozo}$$

$$\text{Número de tiros} = 39 * 20 = 787$$

- Calcular área de los disparos

$$\text{Área de los disparos} = \text{Número de tiros} * \left(\frac{\pi * \text{Diámetro del disparo}^2}{4} \right)$$

$$\mu_{\text{rel}} = 787 * \left(\frac{0,45 * \left(\frac{0,0254}{4} \right)^2}{1} \right) = 0,808$$

- Calcular la tasa de cizalla

$$\dot{\gamma} = \frac{v * r}{r_{\text{pl}} * \sqrt{2 * \mu * r}}$$

Reemplazando en la ecuación, se tiene

$$\dot{\gamma} = \frac{4 * 250^3 * \left(\frac{1}{86.400} \right)}{2 * \sqrt{0,808 * 8 * 0,3 * 1.000 * \left(\frac{1.000}{9,8692 * 10^{-13}} \right)^2}}$$

$$\dot{\gamma} = 22.222 \text{ s}^{-1}$$

2. Pozo con completamiento de perforaciones con 50% de colapso.

- Convertir los disparos por pie a disparos por metro

$$\text{disparos/m} = 12 \text{ disparos/ft} * \frac{1 \text{ ft}}{0,3048 \text{ m}} = 39$$

- Determinar el número de tiros en el completamiento

$$\text{disparos} = \text{disparos/m} * \text{profundidad (m)}$$

$$\text{disparos} = 39 * 20 = 787$$

- Calcular área de los disparos

$$A_{\text{disparos}} = \text{disparos} * \left[\frac{v_{\text{pl}}}{v} * \sqrt{\left(\frac{v_{\text{pl}}}{v} \right)^2 + \left(\frac{v_{\text{pl}}}{v} \right)^2} \right]$$

$$\mu_{\text{aproximado}} = 787$$

$$* \left[\left(\frac{0,45 \cdot \frac{0,0254}{1}}{2} \right) \right]$$

$$* \left(\sqrt{\left(\frac{19,95 \cdot \frac{0,0254}{1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,45 \cdot \frac{0,0254}{1}}{2} \right)^2} \right)$$

$$\mu_{\text{aproximado}} = 3,5828 \cdot 10^2$$

- Calcular la tasa de cizalla

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\mu_{\text{aproximado}} \cdot \sqrt{\tau \cdot \tau}}$$

Remplazando,

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot 250^3 \cdot \left(\frac{1}{86.400} \right)}{3,6636 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{8 \cdot 0,3 \cdot 1.000} \cdot \left(\frac{9,8692 \cdot 10^{-13}}{1.000} \right)}$$

$$\dot{\gamma} = 2222 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$$

3. Pozo con completamiento de perforaciones con penetración total (0% colapsadas).

- Convertir los disparos por pie a disparos por metro

$$\text{disparos/m} = 12 \text{ disparos/ft} \cdot \frac{1 \text{ ft}}{0,3048 \text{ m}} = 39$$

- Determinar el número de shots en el completamiento

$$\text{shots} = \text{shots/m} \cdot \text{longitud del pozo}$$

$$\text{shots} = 39 \cdot 20 = 787$$

- Calcular área de los disparos

$$Q = \frac{Q_{\text{inyectada}}}{\sqrt{\left(\frac{Q_{\text{inyectada}}}{Q_{\text{inicial}}}\right)^2 + \left(\frac{Q_{\text{inyectada}}}{Q_{\text{inicial}}}\right)^2}}$$

$$Q_{\text{inyectada}} = Q_{\text{inicial}} \cdot \left[\left(\frac{Q_{\text{inyectada}}}{Q_{\text{inicial}}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{\text{inyectada}}}{Q_{\text{inicial}}} \right)^2 \right]$$

$$Q_{\text{inicial}} = 787$$

$$* \left[\left(\frac{0,45 \cdot 787 * 0,0254}{1} \right)^2 \right]$$

$$* \left(\frac{0,45 \cdot 787 * 0,0254}{1} \right)^2$$

$$+ \sqrt{\left(19,95 * \frac{0,0254}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,45 \cdot 787 * 0,0254}{1}\right)^2} \cdot 2$$

$$Q_{\text{inyectada}} = 7,245 \cdot 10^2$$

- Calcular la tasa de cizalla

$$\dot{\gamma} = \frac{Q \cdot \eta}{\mu_{\text{inicial}} \cdot \sqrt{Q \cdot \eta \cdot \eta}}$$

Remplazando,

$$\dot{\gamma} = \frac{4 * 250 \cdot 10^3 * \left(\frac{1 \cdot 10^3}{86.400} \right)}{7,245 \cdot 10^2 * 8 * 0,3 * 1.000 \cdot 10^3 * \left(\frac{1.000 \text{ md}}{1.000} \right)}$$

$$\dot{\gamma} = 2222 \cdot 10^{-2}$$

Ejemplo 2: Un pozo de 8,6 (pulgadas) de diámetro que esta completado a hueco abierto con un slotted liner con área abierta (Open Área) de 3% y una longitud de 20 metros, se va a inyectar

una solución polimérica a una tasa de 250 metros cúbicos al día. La formación en la cual se va a inyectar la solución polimérica tiene una porosidad de 30% y una permeabilidad de 1000 md. Hallar la tasa de cizalla generada.

Solución:

- Calcular el área del pozo

$$A_{\text{pozo}} = 2 * A_{\text{fractura}} * \text{porosidad} * \text{permeabilidad} * \text{tasa de inyección}$$

$$A_{\text{pozo}} = 2 * (2, 222 * \frac{2, 2222}{2, 22}) * 2, 22$$

$$A_{\text{pozo}} = 22, 222 \text{ m}^2$$

- Calcular el área de inyección

$$A_{\text{inyección}} = A_{\text{pozo}} * \text{porosidad} * \text{permeabilidad}$$

$$A_{\text{inyección}} = 22, 222 \text{ m}^2 * 2, 22$$

$$A_{\text{inyección}} = 2, 2222 \text{ m}^2$$

- Calcular la tasa de cizalla

$$\gamma = \frac{Q * \mu}{A_{\text{inyección}} * \sqrt{2 * Q * \mu}}$$

$$\gamma = \frac{4 * 250 \text{ m}^3 * (\frac{1, 222}{86.400 \text{ m}^2})}{2, 222}$$

$$0,4117 \text{ m}^2 * \sqrt{8 * 0,3 * 1.000 \text{ m}^2 * (\frac{9,8692 * 10^{-13} \text{ m}^2}{1000 \text{ m}^2})}$$

$$\gamma = 22, 222 \text{ m}^{-2}$$

Ejemplo 3: Un pozo fracturado de 8,6 (pulgadas) de diámetro con media longitud de fractura de 0,5 metros y una longitud de 20 metros, se va a inyectar una solución polimérica a una tasa de

250 metros cúbicos al día. La formación en la cual se va a inyectar la solución polimérica tiene una porosidad de 30% y una permeabilidad de 1000 md. Hallar la tasa de cizalla generada.

Solución:

- Calcular el área de fractura

$$Q_{fractura} = 2.2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1} \times 0.3 \times 1000 \text{ md} \times 0.001 \text{ cm}^2 \text{ md}^{-1} \times 0.001 \text{ cm}^2 \text{ md}^{-1}$$

$$Q_{fractura} = 2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1} \times 0.3 \times 1000 \text{ md} \times 0.001 \text{ cm}^2 \text{ md}^{-1}$$

$$Q_{fractura} = 600 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$$

- Calcular la tasa de cizalla

$$\dot{\gamma} = \frac{Q \times \mu}{Q_{fractura} \times \sqrt{2 \times k \times h}}$$

Remplazando en la ecuación

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \times 250 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \left(\frac{1 \text{ día}}{86.400 \text{ s}} \right)}{40 \text{ m}^2 \times \sqrt{\frac{9,8692 \times 10^{-13} \text{ m}^2}{8 \times 0,3 \times 1.000 \text{ md} \times (1.000 \text{ md})}}}$$

$$\dot{\gamma} = 222 \text{ s}^{-1}$$

3.5 Cálculo de la viscosidad a partir de la tasa de cizalla

El principal objetivo de este trabajo de grado es poder cuantificar la degradación de la solución polimérica en términos de viscosidad. Al realizar el planteamiento de inyección de polímeros se tiene en cuenta la reducción de movilidad generada a partir del aumento de la viscosidad del fluido a inyectar. Es necesario entonces conocer la viscosidad con la que la solución polimérica llega al yacimiento para hacer contacto con el aceite.

Conociendo la tasa de cizalla que se genera en tubería, accesorio y cara de pozo, se puede calcular que tanto se ha disminuido la viscosidad de la solución. La forma para llegar a esto, es haciendo una prueba de laboratorio, en la que se exponga la solución polimérica a una tasa de cizalla donde se verifique la disminución de la viscosidad en la solución polimérica. Con estos datos de laboratorio, se procede a la implementación de un modelo reológico, con el cual se pueda determinar la degradación mecánica en términos de viscosidad a partir de la tasa de cizalla que se ha generado en cualquier accesorio o sección por donde fluya la solución polimérica.

Existen varios tipos de modelos reológicos con los cuales se puede relacionar los datos de viscosidad y tasa de cizalla, pero el más completo es el modelo reológico de Carreau. Este modelo provee una muy buena gama completa de η , se ajusta para varios sistemas de polímeros, y siendo un modelo de cuatro parámetros lo hace más robusto comparándolo con la ley de la energía que es un modelo de dos parámetros.

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left[1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^2 \right]^{-\frac{n-1}{2}}$$

η = viscosidad en el tiempo t.

η_0 = Viscosidad a shear rate cero.

η_{∞} = Viscosidad a un valor infinito de shear rate, es la región no dilatante.

τ_c = una constante de tiempo.

n = constante adimensional, $0.4 \leq n \leq 1.0$ para fluidos pseudoplásticos.

La zona τ_0 , es la zona en donde el polímero recibe cierta tasa de cizalla, pero este no se degrada ya que la solución polimérica se comporta como un fluido newtoniano, con viscosidad constante. La siguiente es la zona donde se genera una pendiente en la gráfica η - $\dot{\gamma}$ en la gráfica, la cual se comporta como la ley de la energía. Esta zona tiene comportamiento de fluido pseudoplástico, y se generan pérdidas de viscosidad debido la tasa de cizalla aplicada al fluido al atravesar

accesorios. La última zona es considerada la viscosidad infinita, la cual es la mínima viscosidad que puede tener el fluido ya que es considerada como la viscosidad del solvente.

Al crear este modelo reológico, a partir de datos de laboratorio, se puede calcular la viscosidad de la solución polimérica en estudio a partir del cálculo de la tasa de cizalla que se ha generado en cualquier accesorio, o en cualquier área por la que pueda atravesar esta solución polimérica. Considerando que cada solución polimérica es totalmente diferente a otra, es necesario para cada proyecto realizar un modelo reológico diferente, ya que todas las soluciones poliméricas no van a comportarse de la misma manera. Los factores que la hacen diferentes son, entre otros, el grado de hidrolisis del polímero, la temperatura, el tipo de agua con la que se preparó el polímero, y la concentración del polímero.

Se supone la viscosidad inicial de 22 (cp), obteniendo el siguiente comportamiento de la viscosidad a medida que se incrementa la tasa de cizalla. Se obtiene a partir de la prueba de la laboratorio Flopaam-3230S, representada en la figura 18.

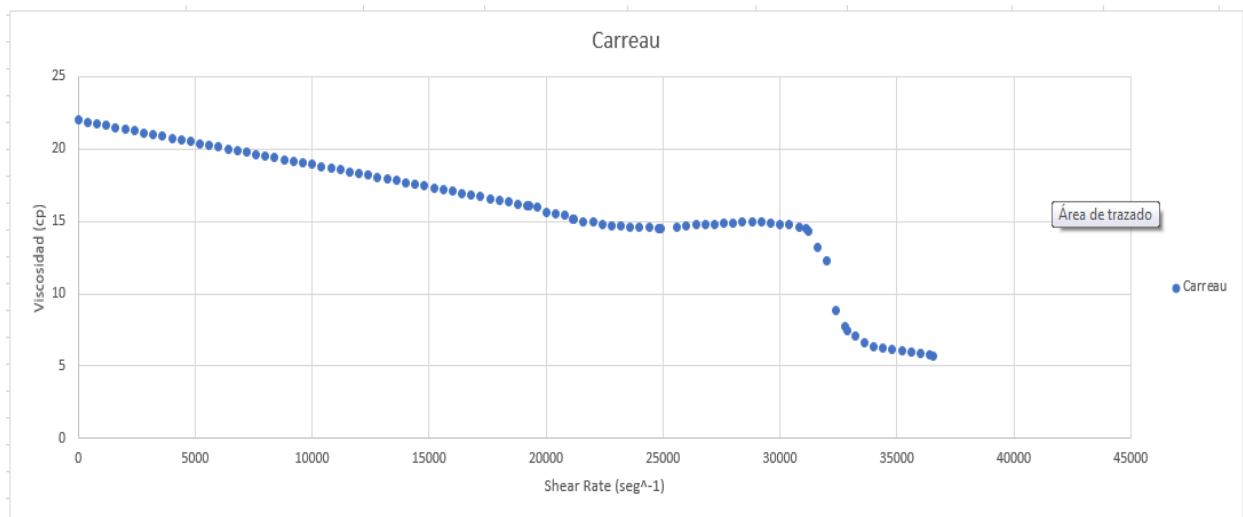


Figura 21. Representación gráfica de la prueba de laboratorio con el polímero FP-3230S, para posterior división y ajuste de modelos matemáticos.

En la hoja de cálculo desarrollada pestaña “Viscosidad” se evidencia el proceso de ajuste de la gráfica. Se realiza dividiendo la curva en 4 secciones.

1.
$$\tau = 1 + (22 - 1) * [1 + (0,000111\dot{\gamma})^2]^{(0,6-1)/2}$$

Se utiliza el modelo de Carreau con $\tau_{\infty} = 1$, $\tau_0 = 22$, $\lambda=0,000111$ y $n=0,6$ para tasas de cizalla entre 0 y 22.000 s^{-1} .

2.
$$\tau = 50\dot{\gamma}^{0,8805-1}$$

Se utiliza el modelo de ley de energía con $\tau = 50$ y $\tau = 0,8805$ para tasas de cizalla entre 22.400 y 30.400 s^{-1} .

3.
$$\tau = -0,00252 * \dot{\gamma} + 92$$

Se utiliza una ecuación lineal de pendiente $\tau = -0,00252$ e intercepto con el eje vertical $\tau = 92$ para tasas de cizalla entre 30.800 y 33.600 s^{-1} .

4.
$$\tau = -0,000259 * \dot{\gamma} + 15$$

Se utiliza una ecuación lineal de pendiente $\tau = -0,000259$ e intercepto con el eje vertical $\tau = 15$ para tasas de cizalla ≥ 34000 s^{-1} .

4. Validar la herramienta desarrollada y aplicarla a un caso de estudio.

La herramienta computacional se valida por medio de los datos de un campo petrolero ubicado en el valle medio de magdalena operado por ECOPETROL.

Datos superficie:

- Longitud de Tubería: 15 metros.
- Schedule de 40 y diámetro nominal 2 pulgadas
- Caudal de inyección entre 1.000 y 5.000 barriles por día.

Datos subsuelo:

- Porosidad: 0,2 – 0,25.
- Permeabilidad: 500-1.000 milidarcys.
- Longitud completada: 40-100 Pies.
- Longitud del Tubing: 5.000 Pies.
- Diámetro del Tubing: 2,875 pulgadas.
- Caída de presión en el Tubing: 400-500 psi.

Se presentan los datos de la viscosidad perdida debido a la degradación mecánica ejercida por la tubería de 15 metros de longitud con un Schedule de 40 y diámetro nominal de 2 pulgadas con un caudal de entre 1.000 a 5.000 Barriles por día. La viscosidad inicial es de 22 centipoises y la densidad de 1,1 gramos por centímetro cúbico.

Tabla 3.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad, según el caudal de flujo en tubería de superficie.

Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000	129,73250	21,99912
1.200	155,67900	21,99874
1.400	181,62550	21,99829
1.600	207,57201	21,99777
1.800	233,51851	21,99717
2.000	259,46501	21,99651
2.200	285,41151	21,99578
2.400	311,35801	21,99498
2.600	337,30451	21,99411
2.800	363,25101	21,99317
3.000	389,19751	21,99217
3.200	415,14401	21,99109
3.400	441,09052	21,98994
3.600	467,03702	21,98873
3.800	492,98352	21,98744
4.000	518,93002	21,98609
4.200	544,87652	21,98467
4.400	570,82302	21,98317
4.600	596,76953	21,98161
4.800	622,71603	21,97999
5.000	648,66253	21,97829

A continuación, se presentan la viscosidad con la que sale la solución polimérica al pasar por el Tubing al cambiar el caudal de inyección en el sistema de 1000 a 5000 Barriles por día y variando la caída de presión en el tubing de 400 a 500 psi.

Tabla 4.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 500 psi.

presión (PSI)	500	
Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000	833,64916	21,94255
1.200	1200,454	21,90458
1.400	771,94466	21,94762
1.600	882,22247	21,93828
1.800	992,50028	21,92773
2.000	1.102,7780	21,91598
2.200	1.213,0559	21,90304
2.400	1.323,3337	21,88891
2.600	1.433,6115	21,87363
2.800	1.543,8893	21,85720
3.000	1.654,1671	21,83964
3.200	1.764,4449	21,82095
3.400	1.874,7227	21,80118
3.600	1.985,0005	21,78033
3.800	2.095,2783	21,75842
4.000	2.205,5561	21,73548
4.200	2.315,8340	21,71153
4.400	2.426,1118	21,68659
4.600	2.536,3896	21,66067
4.800	2.646,6674	21,63382
5.000	2.756,9452	21,60604

Ahora variando la caída de presión en el tubing con diferentes caudales

Tabla 5.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1000-5000bbl/día) de flujo en tubing a 400 psi.

presión (PSI)	400	
Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000	666,91933	21,95537
1.500	661,66685	21,95573
2.000	882,22247	21,93828
2.500	1.102,77809	21,915985
3.000	1.323,33371	21,88891
3.500	1.543,88933	21,85720
4.000	1.764,44495	21,82095
4.500	1.985,00057	21,78033
5.000	2.205,55619	21,73548

Tabla 6.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 420 psi.

presión (PSI)	420	
Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1000	700,26530	21,95303
1500	694,75020	21,95343
2000	926,33360	21,93421
2500	1.157,91700	21,90966
3000	1.389,50040	21,87988
3500	1.621,08380	21,84502
4000	1.852,66720	21,80522
4500	2.084,25060	21,76066
5000	2.315,834	21,71153

Tabla 7.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 440 psi.

presión (PSI)	440	
Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000	733,61126	21,950582
1.500	727,83354	21,95101
2.000	970,44472	21,92994
2.500	1.213,0559	21,90304
3.000	1.455,66709	21,87043
3.500	1.698,27827	21,83229
4.000	1.940,88945	21,78880
4.500	2.183,50063	21,740159
5.000	2.426,11181	21,68659

Tabla 8.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 460 psi.

presión (PSI)	460	
Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000	766,9572	21,94801
1.500	760,91688	21,94849
2.000	1.014,555	21,925484
2.500	1.268,1948	21,89612
3.000	1.521,8337	21,86057
3.500	1.775,4727	21,81902
4.000	2.029,1117	21,771698
4.500	2.282,75066	21,71882
5.000	2.536,38962	21,66067

Tabla 9.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 480 psi.

Presión (PSI)	480	
Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000	800,30320	21,94533
1.500	794,00023	21,94585
2.000	1.058,66697	21,92083
2.500	1.323,33371	21,88891
3.000	1.588,00046	21,85030
3.500	1.852,66720	21,80522
4.000	2.117,33394	21,75392
4.500	2.382,00069	21,69668
5.000	2.646,66743	21,63382

Tabla 10.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en tubing a 500 psi.

presión (PSI)	500	
Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000	833,64916	21,94255
1.500	827,08357	21,94311
2.000	1.102,7780	21,91598
2.500	1.378,47262	21,88142
3.000	1.654,16714	21,83963
3.500	1.929,86167	21,79089
4.000	2.205,55619	21,73548
4.500	2.481,25072	21,673755
5.000	2.756,94524	21,606042

Para la parte de completamiento se evalúa con una viscosidad de 21,96342 al fondo del tubing, antes de pasar por los perforados. Se tabulan los resultados con un caudal de inyección variando

entre 1.000 y 5.000 Barriles por día, porosidad de 0,25, permeabilidad de 800 milidarcys con perforaciones colapsadas al 80% con 12 tiros por pie, 20 metros de longitud completada, 0,45 pulgadas de diámetro de disparo, 19.95 pulgadas de profundidad de penetración y un diámetro de pozo de 7 pulgadas. Un slotted liner con área abierta de 0,4% y yacimiento fracturado con una longitud de fractura de 0,5 metros.

Perforaciones 80% colapsadas

Tabla 11.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en perforados 80% colapsados.

Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000	4.081,81868	21,19501
1.200	4.898,18241	20,90523
1.400	5.714,54615	20,5925
1.600	6.530,90989	20,26540
1.800	7.347,27362	19,93098
2.000	8.163,63736	19,59489
2.200	8.980,00110	19,26147
2.400	9.796,36483	18,93386
2.600	10.612,72857	18,61430
2.800	11.429,09230	18,304270
3.000	12.245,45604	18,00465
3.200	13.061,81978	17,71594
3.400	13.878,18351	17,43830
3.600	14.694,54725	17,17166
3.800	15.510,91099	16,91582
4.000	16.327,27472	16,67044
4.200	17.143,63846	16,43516
4.400	17.960,00220	16,20953
4.600	18.776,36593	15,99312
4.800	19.592,72967	15,78547

Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
5.000	20.409,09340	15,58614

Slotted Liner

Tabla 12.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en hueco abierto con slotted liner.

Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000	1.310,81231	21,87576
1.200	1.572,97477	21,83789
1.400	1.835,13723	21,79365
1.600	2.097,2996	21,74329
1.800	2.359,46216	21,68710
2.000	2.621,6246	21,62535
2.200	2.883,78708	21,55839
2.400	3.145,94954	21,48651
2.600	3.408,11200	21,41006
2.800	3.670,27445	21,329384
3.000	3.932,43693	21,244815
3.200	4.194,5993	21,1566
3.400	4.456,76185	21,065369
3.600	4.718,92432	20,97115
3.800	4981,08678	20,874374
4.000	5.243,2492	20,77533
4.200	5.505,41170	20,67432
4.400	5.767,57416	20,571634
4.600	6.029,73663	20,4675174
4.800	6.291,89909	20,3622269
5.000	6.554,06155	20,255995

Yacimiento fracturado

Tabla 13.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el caudal (1.000-5.000bbl/día) de flujo en yacimiento fracturado.

Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000	146,43744	21,96231
1.200	175,72495	21,96182
1.400	205,01242	21,96124
1.600	234,29990	21,96058
1.800	263,58739	21,95983
2.000	292,87488	21,95898
2.200	322,16234	21,95806
2.400	351,44986	21,95704
2.600	380,73735	21,95593
2.800	410,02484	21,95474
3.000	439,31232	21,9534
3.200	468,59981	21,9520
3.400	497,88730	21,95063
3.600	527,17479	21,949
3.800	556,46228	21,9474
4.000	585,74977	21,9457
4.200	615,03726	21,943
4.400	644,32474	21,9420
4.600	673,61223	21,94005
4.800	702,89972	21,93798
5.000	732,187214	21,93583

En el completamiento de pozo perforado se realiza se tabula los valores de tasa de cizalla generados con un caudal de inyección de 1500 Barriles por día para perforaciones totalmente colapsadas hasta una perforación sin colapsarse, los demás parámetros se mantienen igual.

Porcentaje de colapso en la perforación

Tabla 14.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el porcentaje de colapso de las perforaciones.

% Colapso	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
100	108.748,87322	0
95	23.928,6395	14,98612
90	10.149,2708	18,79463
80	6.122,72802	20,43029
70	4.085,41754	21,19380
60	3.065,00955	21,50921
50	2.452,35831	21,66584
40	2.043,79072	21,75405
30	1.751,9027	21,80837
20	1.532,961486	21,844088
10	1.362,66084	21,86879
0	1.226,41305	21,88657

5. Resultados

La solución polimérica inicia con una viscosidad de 22 centipoises y con una densidad de 1 gramo por centímetro cúbico. La tabla 50 muestra que al incrementarse el caudal desde 1.000 BPD a 5.00 BPD el cizallamiento se incrementa, pero el aumento de pérdida de viscosidad es insignificante en los 15 metros de tubería configurada.

En la degradación mecánica ejercida por las válvulas la constante de resistencia k de cada accesorio tiene un efecto importante en el cálculo de las pérdidas de carga, por ejemplo, para la válvula de compuerta de cuña Clase 150 NPS 1 esta constante tiene un valor de 8 multiplicado por

el factor de fricción al cual genera una pérdida de carga de 0,01431 metros con un caudal de 1.000 BPD los cuales generan una cizalla de $1.379,420 \text{ s}^{-1}$. Para una válvula de Pie con filtro de obturador oscilante con constante $75 * f$ genera una pérdida de carga de 0,1342 metros generando una cizalla de $650.919,079 \text{ s}^{-1}$ la cual no se puede correlacionar con la viscosidad debido a que supera los 40.000 s^{-1} y se supone que degradaría toda la viscosidad.

Válvulas con valores de constantes de resistencia altos como válvula de retención de obturador ascendente Clase 150 con valor de $600 * f$ genera pérdidas de carga de 4,597 metros con una cizalla de $484.721.581,90 \text{ s}^{-1}$ degradando toda la viscosidad igual que la válvula mencionada anteriormente.

En el procedimiento de cálculo de las pérdidas por fricción ejercidas por estas válvulas se tiene en cuenta la velocidad de flujo a través de los diámetros de fabricación de las válvulas para conectar a una tubería de 2 pulgadas de diámetro y sus respectivas longitudes. El mayor efecto en las pérdidas de carga y por ende en la caída de presión lo tiene la constante de resistencia que la da el fabricante de la válvula, debido a que los diámetros y las longitudes de fabrica son valores que no se diferencian en gran medida (ver tabla No. 15) entonces las velocidades de flujo y la longitud para la geometría hipotética de donde se correlaciona la tasa de cizalla no van a ser muy diferentes y el efecto que tendrán en la cizalla generada será el mismo.

Tabla 15.

Datos de constante de resistencia, diámetro y longitud de las válvulas utilizadas en la herramienta computacional.

Accesorio	k	Longitud (metros)	Diámetro (metros)
Válvula de compuerta de cuña clase 150 NPS 1	8*f	0,191	0,0525
Válvula de compuerta de cuña clase 150 NPS 1 3/4 Abierta	35*f	0,191	0,0525
Válvula de compuerta de cuña clase 150 NPS 1 1/2 Abierta	160*f	0,191	0,0525
Válvula de compuerta de cuña clase 150 NPS 1 1/4 Abierta	900*f	0,191	0,0525
Válvula de Retención de obturador ascendente Clase 150	600*f	0,203	0,0365
Válvula de Retención y cierre tipo recto SVA-S 50	400*f	0,148	0,032
Válvula de Retención y cierre tipo angular SVA-S-50	200*f	0,06	0,0525
Válvula de Pie con filtro de obturador oscilante	75*f	0,23	0,0525

Tabla 16.

Datos de pérdidas de viscosidad según el tipo de válvula.

Accesorio	hL(m)	ΔP (Pa)	SR (seg-1)	Viscosidad (cp)
Válvula de compuerta de cuña Clase 150 NPS 1	1,431E-02	154,359	1.379,420	21,902
Válvula de compuerta de cuña Clase 150 NPS 1 3/4 Abierta	6,264E-02	675,324	115.512,97	0
Válvula de compuerta de cuña Clase 150 NPS 1 1/2 Abierta	0,28638	3.087,196	1.103.5361,5290	0
Válvula de compuerta de cuña Clase 150 NPS 1 1/4 Abierta	1,610898	17.365,480	1.964.057.264,32	0
Válvula de Retención de obturador ascendente Clase 150	4,5966	49.552,0137	484.721.581,90	0
Válvula de Retención y cierre tipo recto SVA-S 50	5,187	55.916,7078	370.613.766,497	0
Válvula de Retención y cierre tipo angular SVA-S-50	0,3579	3.858,9957	695.285.152,385	0
Válvula de Pie con filtro de obturador oscilante	0,1342	1.447,1233	650.919,07938	0

En superficie al variar el diámetro interno de la tubería con un caudal de 1.000 BPD en una tubería de 15 metros se tienen los siguientes datos.

Tabla 17.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según el diámetro de la tubería en superficie.

Diámetro Interior (Pulg)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
5,047	8,90969	21,99999
4,027	17,53475	21,99998
3,547	25,66565	21,99996
3,066	39,71132	21,99991
2,468	76,15950	21,99969
2,06692	129,73250	21,99912
1,61023	274,38274	21,99610
1,38188	434,11557	21,99026
1,04724	997,42858	21,94889
0,82677	2.027,07041	21,79359
0,62204	4.759,43564	20,99118
0,49212	9.611,62194	19,03879
0,36220	24.108,11405	14,97274
0,26771	59.703,52608	0

En el tubing al varia la caída de presión de 400 a 500 psi con un caudal fijo no genera importantes cambios en la viscosidad, la tasa de cizalla generada no diferencia en gran medida como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 18.

Sensibilidad de pérdidas de viscosidad según caída de presión y cambio de caudal en el tubing.

Presión (psi)	400		Presión (psi)		500	
	Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)	Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
1.000		666,91933	21,95537	1.000	833,64916	21,942550
1.500		661,66685	21,95573	1.500	827,08357	21,94311
2.000		882,22247	21,93828	2.000	1.102,77809	21,915985
2.500		1.102,77809	21,915985	2.500	1.378,47262	21,881420
3.000		1.323,33371	21,88891	3.000	1.654,16714	21,83963

Presión (psi)	400		Presión (psi)		500	
	Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)	Caudal (BPD)	SR (seg-1)	Viscosidad Final (cp)
3.500	1.543,88933	21,85720	3.500	1.929,86167	21,79089	
4.000	1.764,44495	21,82095	4.000	2.205,55619	21,73548	
4.500	1.985,00057	21,78033	4.500	2.481,25072	21,67375	
5.000	2.205,55619	21,73548	5.000	2.756,94524	21,60604	

Al incrementar el caudal de 1.000 a 5.000 BPD se tiene un incremento considerable en la tasa de cizalla generada desde valores de 800 s^{-1} aproximadamente hasta los 2.756 s^{-1} entregando una viscosidad con 5.000 BPD de 21.606 centipoises. No hay una importante pérdida de viscosidad debido a que la tasa de cizalla es menor a 32.000 s^{-1} .

En el completamiento se tiene poca variación de la viscosidad perdida cuando se cambia el caudal con la configuración de slotted liner y en la fractura. Se obtiene una importante pérdida de viscosidad en las perforaciones colapsadas entregando una viscosidad de aproximadamente 15 centipoises con una inyección de 5.000 BPD a 80% de colapso.

6. Conclusiones

- El único parámetro en el sistema de superficie que al variar tiene un porcentaje de pérdida significativo es el diámetro interior de la tubería, un valor menor a 0,622 pulgadas de diámetro interior representa un porcentaje perdido entre 15 a 100% de la viscosidad inicial por lo que se recomienda trabajar con tuberías de diámetros interiores mayores a 0,622 pulgadas.

- El diámetro y la longitud de la válvula no genera efecto importante en la tasa de cizalla correspondiente a cada accesorio a través de la velocidad de flujo. El coeficiente de resistencia k de la válvula es el parámetro que más efecto tiene en la cizalla generada.
- En el sistema de perforados el parámetro que al variar tienen un porcentaje de pérdida significativo es el porcentaje de colapso de la perforación, es recomendable trabajar con valores menores o iguales a 90% de colapso, debido a que con valores mayores se obtendría porcentajes de pérdida mayores a 25% de la viscosidad del fluido en fondo de pozo.
- Para conocer la viscosidad perdida en cada valor de cizalla generado se debe construir un modelo reológico que correlacione la disminución de la viscosidad con la tasa de cizalla aplicada. El modelo proporcionado solo funciona para el polímero Flopaam-3230S mezclado con el agua de captación de un campo petrolero ubicado en el Valle Medio del Magdalena el cual es operado por Ecopetrol.
- El uso de restricciones fuertes como válvulas tipo apertura media y tipo On-Off, afectan fuertemente la viscosidad de la solución polimérica

7. Recomendaciones

- Utilizar accesorios diferentes a los contemplados en este trabajo.
- Ingresar las gráficas de la prueba reológica de otros polímeros con sus respectivas aguas de captación y sus modelos reológicos.

- Estimar las pérdidas de viscosidad del fluido polimérico debido a la degradación mecánica ejercida por el medio poroso.
- Optimizar la geometría de los diferentes completamientos utilizados.
- Construir una herramienta computacional donde se visualice el sistema gráficamente mostrando todos sus elementos desde superficie hasta la geometría en el completamiento.

Referencias Bibliográficas

Laboratorio Recobro mejorado. Ecopetrol. (s.f.). *Evaluación experimental PF Laboratorio química de producción*,.

Calderon, Z. Y Pérez, M. (2011). *Orientaciones prácticas para la elaboración exitosa de trabajos de grado en ingeniería*. Bucaramanga : División de Publicaciones UIS.

Castro-García, R., Maya Toro, G., Jiménez Diaz, R., Quintero Pérez, H., Diaz Guardia, V., Colmenares-Vargas, K., . . . & Pérez Romero, R. (s.f.). Polymer flooding to improve volumetric sweep efficiency in waterflooding processes,. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 6(3), 71-90.

Cengel Yunus, A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de fluidos, Fundamentos y aplicaciones*. McGraw Hill/ Interamericana Editores, S.A de CV.

Fernández, I. J. (s.f.). *Polímeros en solución y aplicación de los polímeros en la industria petrolera PDVSA-INTEVEP*. . Estado Miranda, 1201. Venezuela: Departamento de Manejo Integrado de Producción, Urbanización Santa Rosa, Sector El Tambor, Los Teques,.

Hashmi, A. A., Maamari, R. A., Shabibi, I. A., Mansoor, A., Zaitoun, A., & H.H. Sharji, A. (2013). Rheology and mechanical degradation of high- molecular- weight partially hydrolyzed polyacrylamide during flow through capillaries. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 105 , 100-106.

Jouenne, S., Anfray, J., Cordelier, P. R., Mateen, k., & Levitt, D. (2014). Degradation (or Lack Thereof) and Drag Reduction of HPAM During Transport in Pipelines. TOTAL, GEMICO-LRGP- ENSIC- LL, Nalco Tiorco Fabtech. *EOR Conference at Oil and Gas West Asia held in Muscat Omán*.

Mobile fines Management & concept of critical velocity. (s.f.).

Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations. (1990). , API Recommended Practice 63 (RP63), First Edition, June 1, .

Sorbie, K. S., & Phil, D. (s.f.). *Polymer-Improved Oil Recovery, reader in petroleum engineering, department of petroleum Engineering* . Edinburgh: Heriot-Watt University.

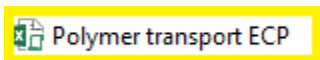
Zaitoun, A. (2011). Shear stability of EOR polymers. SPE 141113. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in the Woodlands, Texas, USA*, 11-13.

Zaitoun, A., & Kohler, N. (s.f.). *The Role of Adsorption in Polymer Propagation Through Reservoir Rocks*. Inst. Francais du Pétrole, SPE 16274.

Apéndices

Apéndice A. Tutorial de cómo manejar la herramienta creada para el cálculo de pérdidas de viscosidad de Polymer Flooding, en facilidades de superficie, pozo y cara de pozo.

Como primera instancia se debe abrir el archivo de Excel con el nombre de Polymer transport



ECP.

Figura 22. Archivo Excel.

Al abrir este archivo, se verán 6 hojas de cálculo en las cuales están todas las operaciones, con las que se llevan a cabo todos los cálculos, para llegar a las pérdidas de viscosidad generadas en los accesorios y en el completamiento. Se debe tener en cuenta que para cada solución polimérica se debe crear su propio modelo geológico a partir de pruebas de laboratorio que relaciones la viscosidad del fluido con la tasa de cizalla. Ya teniendo este modelo desarrollado y cargado en la hoja de cálculo de viscosidad, el usuario debe ir a la primera hoja que tiene como nombre “Superficie” (figura 23), se encuentra el botón con el nombre “INGRESAR VALORES” que se debe oprimir para poder ingresar los datos necesarios para generar los cálculos. Luego de oprimir este botón, aparece la ventana emergente mostrada en la figura 24.

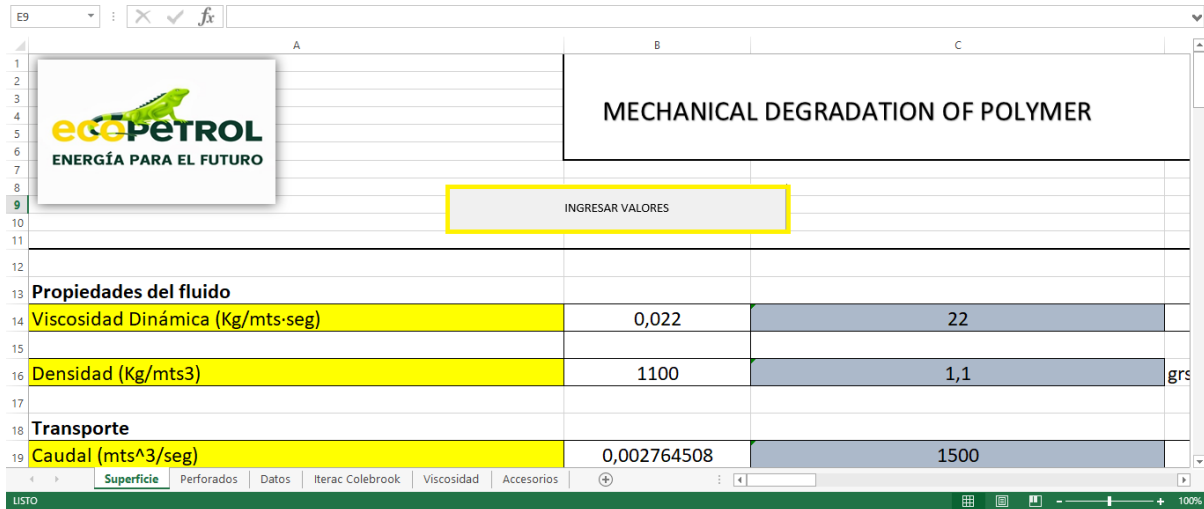


Figura 23. Hoja de cálculo “superficie”

Luego de que se abra esta ventana emergente, el usuario debe proceder a ingresar los datos iniciales, que son indispensables para el cálculo de pérdida de viscosidad en accesorios y tubería en superficie, (figura 24) los cuales son, la viscosidad dinámica, densidad de la solución polimérica, caudal con el cual está fluyendo la solución polimérica, longitud de la tubería en la cual fluye, tipo de tubería con su respectivo Schedule, en este proyecto, solo se trabajó con tubería de acero comercial y se manejan los Schedule de 10, 20,30,40,60,80,100 y 120, cada Schedule tiene sus diferentes diámetros nominales. La herramienta está configurada de tal forma, que cuando se seleccione un Schedule, se pueda seleccionar solo los diámetros nominales que se encuentran en aquel Schedule. Figura 25.

Figura 24. Datos iniciales.

Automáticamente, después de haber seleccionado el Schedule y el diámetro nominal, la herramienta da las medidas de diámetro exterior, espesor y diámetro interior (figura 25). A partir de estos datos, el usuario debe oprimir el botón “Agregar”, para que con los datos ya ingresados en la herramienta, esta pueda calcular el número de Reynolds, el factor de fricción de flujo en tubería, la rugosidad en metros, y la rugosidad relativa, los cuales son factores necesarios para luego poder calcular la tasa de cizalla en cada tipo de accesorio. Figura 26.

Figura 25. Ingreso datos iniciales

Figura 26. Calculo de Reynolds, factor de fricción y rugosidad.

A partir de este momento, se debe introducir en la herramienta el tipo de sistema en el cual se quiera calcular la pérdida de viscosidad en superficie, teniendo en cuenta el número de accesorios y tuberías. La herramienta está configurada para poder ingresar hasta 10 tipos de accesorios al mismo tiempo. El usuario debe ingresar el primer accesorio y oprimir el botón “calcular” para que el programa haga las operaciones correspondientes, con el fin de hallar, la pérdida de altura, caída de presión, tasa de cizalla, porcentaje de pérdida de viscosidad y la viscosidad final cuando la solución fluya a través de ese accesorio seleccionado en la casilla “Accesorio 1”. Figura 27

El usuario debe seguir ingresando los accesorios en el orden en el que tenga planteado su sistema en superficie, en las siguientes casillas de “Accesorios”, cabe recordad que solamente se podrá, ingresar 10 accesorios en la configuración. Luego de haber ya configurado el sistema de superficie, el usuario debe oprimir el botón “Calcular” para poder obtener el porcentaje de pérdida de viscosidad y la viscosidad final después de que la solución fluya a través del sistema construido (en este paso, hacer caso omiso al valor de pérdidas de altura, caída de presión y tasa de cizalla ya que estos pertenecen al primer Accesorio seleccionado). Figura 28.

DATOS INICIALES

Shear Rate en Sistema de Superficie

Propiedades del Fluido

Viscosidad Dinámica (cp) = 22

Densidad Mezcla Polimérica (grs/cm3) = 1,1

Transporte

Caudal (Bls/dia) = 1000

Longitud de Tubería (mts) = 15

Tipo de Tubería = Acero Comercial

Schedule = 40

Diámetro Nominal (Pulg) = 2

Diámetro Exterior (mm) = 60,3

Espesor (mm) = 3,91

Diámetro Interior (mm) = 52,5

Calcular

Agregar

Diámetro Interior (Pulg) = 2,06692913385827

Reynolds = 2234,845132666

Factor de Fricción Flujo = 4,839999999999999E-02

Rugosidad (mts) = 0,000045

Rugosidad Relativa = 8,57142857142857E-04

Accesorios Utilizados

Accesorio 1 Tubería Configurada

Pérdidas de Altura (hL mts) = 0,5113996200626511

Caída de Presión (Pascales) = 5512,85104275379

Shear Rate (seg-1) = 129,732506567508

% Pérdida de Viscosidad = 3,95836788904737E-03

Accesorio 2

Accesorio 3

Accesorio 4

Accesorio 5

Accesorio 6

Accesorio 7

Accesorio 8

Accesorio 9

Accesorio 10

Viscosidad Final (cp) = 21,9991291590644

Acumulado Configurar Tubing Cerrar

Figura 27. Ingreso de primer accesorio y cálculo de tasa de cizalla y pérdida de viscosidad

Para continuar con el cálculo de las pérdidas de viscosidad en el sistema de Polymer flooding, el usuario debe oprimir el botón “Configurar Tubing”, el cual abrirá otra ventana emergente, donde el programa ya por defecto tiene carga los datos utilizados en el sistema de superficie. Figura 29.

DATOS INICIALES

Shear Rate en Sistema de Superficie

Propiedades del Fluido

Viscosidad Dinámica (cp) = 22

Densidad Mezcla Polimérica (grs/cm3) = 1,1

Transporte

Caudal (Bls/día) = 1000

Longitud de Tubería (mts) = 15

Tipo de Tubería = Acero Comercial

Schedule = 40

Diámetro Nominal (Pulg) = 2

Diámetro Exterior (mm) = 60,3

Espesor (mm) = 3,91

Diámetro Interior (mm) = 52,5

Diámetro Interior (Pulg) = 2,06692913385827

Reynolds = 2234,845132666

Factor de Fricción Flujo = 4,839999999999999E-02

Rugosidad (mts) = 0,000045

Rugosidad Relativa = 8,57142857142857E-04

Accesorios Utilizados

Accesorio 1 = Tubería Configurada

Pérdidas de Altura (hL mts) = 0,511396200626511

Caída de Presión (Pascuales) = 5512,85104275379

Shear Rate (seg-1) = 129,732506567508

% Perdida de Viscosidad = 3,95836788904737E-03

Accesorio 2 = Válvula de compuerta de cuña Clase 150 NPS 1

Accesorio 3 = Codo de 90

Accesorio 4 = Conexión estándar en T Flujo directo

Accesorio 5 =

Accesorio 6 =

Accesorio 7 =

Accesorio 8 =

Accesorio 9 =

Accesorio 10 =

Viscosidad Final (cp) = 21,9002949043748

Figura 28. Calculo de perdida de viscosidad en el sistema de superficie. Configuración del Tubing.

UserForm4

Configuración Tubing

Densidad Mezcla Polimérica (grs/cm3) = 1,1

Caudal (Bls/día) = 1000

Velocidad Flujo (mts/seg) = 0,441576045338748

Profundidad Tubing (Ft) =

Diámetro Interno Tubing (Pulg) =

Factor Fricción = 3,95836768724409E-02

Caída de Presión (PSI) =

Shear Rate (Seg^-1) =

Porcentaje Perdida de Viscosidad (%) =

Viscosidad Final (cp) =

Figura 29. Configuración del Tubing.

Para proseguir con el cálculo de las pérdidas de viscosidad, el usuario debe ingresar la longitud y diámetro del tubing, con la caída de presión en esta parte del sistema. El usuario debe oprimir el botón “Agregar” para enviar los datos a su respectiva hoja de cálculo y luego oprimir el botón “calcular”, para observar los valores generados de la tasa de cizalla, porcentaje de viscosidad perdida y viscosidad final. Figura 30.

Configuración Tubing	
Densidad Mezcla Polimérica (grs/cm ³)=	1,1
Caudal (Bls/dia)=	1000
Velocidad Flujo (mts/seg)=	0,441576045338748
Profundidad Tubing (ft)=	5000
Diametro Interno Tubing (Pulg)=	2,87
Factor Fricción=	3,95836768724409E-02
Caída de Presión (PSI)=	500
Shear Rate (Seg ⁻¹)=	836,618245384279
Porcentaje Perdida de Viscosidad (%)=	0,163754879467299
Viscosidad Final (cp)=	21,8644321028511

Calcular

Agregar Acumulado Configurar Superficie Configurar Perforados Cerrar

Figura 30. Ingreso de datos de tubing, cálculos de tasa de cizalla y pérdidas de viscosidad.

Ya con los cálculos hechos en la configuración del tubing, el usuario debe proceder a oprimir el botón “Configurar Perforados” el cual mostrara una nueva ventana emergente donde el usuario debe ingresar los valores de porosidad, permeabilidad, caudal de inyección y tipo de completamiento en la sección datos. Figura 31.

Figura 31. Ingreso de porosidad, permeabilidad, caudal, y tipo de completamiento.

Después se activarán las casillas respectivas al tipo de completamiento, según e completamiento seleccionado, el usuario debe ingresar los datos requeridos. Para el completamiento de perforados, se debe ingresar: “Tipo de Perforaciones”, “Tiros por Pie”, “Longitud Completada”, “Diámetro de Disparo”, “Profundidad de penetración” y “Diámetro de pozo”. Si se selecciona completamiento slotted linner, se debe ingresar:

“Longitud de completamiento”, “Área Abierta”, “Diámetro de Pozo” y “Longitud de Completamiento”. Y por último para completamiento de yacimiento fracturado, se debe ingresar: “longitud de completamiento” y “Longitud media de Fractura”. Para este tutorial se hará con completamiento con perforados. Luego el usuario debe oprimir el botón “Agregar”. Figura 32.

El siguiente paso, es oprimir el botón “Calcular” y el programa mostrará los respectivos parámetros del tipo de completamiento, la tasa de cizalla que sufre el fluido, el porcentaje de pérdida de viscosidad y la viscosidad final. Figura 33.

Ya con el cálculo de la perdida de viscosidad en el completamiento, el usuario debe oprimir el botón “Viscosidad Total Sistema”, para que el programa muestre otra ventana emergente. Figura 34. Oprimir el botón “Calcular” para poder observar el resultado de del porcentaje de pérdida de viscosidad y la viscosidad final en todo el sistema en general, desde la configuración de superficie, el paso por el tubing y la configuración del completamiento. Figura 34.

The screenshot shows a software window titled "UserForm2" with the main heading "Shear Rate en Perforados". The interface is divided into several sections:

- Datos:**
 - Porosidad: 0,25
 - Permeabilidad (mD): 800
 - Caudal Inyección (Bls/día): 1000
 - Tipo de Completamiento: Perforated Well
- Datos de Completamiento:**
 - Disparos Totales: [Empty]
 - Area del Wellbore (m2): [Empty]
 - Area Total de Tiro (m2): [Empty]
 - Area de Inyeccion (m2): [Empty]
 - Area de Fractura (m2): [Empty]
 - Shear Rate: [Empty]
 - % Viscosidad Perdida: [Empty]
 - Viscosidad Final (cp): [Empty]
- Datos de Entrada de Completamiento (highlighted with a green box):**
 - Tipo de Perforaciones: Perforations Collapsed 90%
 - Tiros por Pie (SPF): 12
 - Longitud Completada (mts): 20
 - Diametro de Disparo (Pulg): 0,45
 - Profundidad de Penetración (Pulg): 19,95
 - Diametro de Pozo (Pulg): 7
- Other Fields:**
 - Area Abierta (Fraccion): [Empty]
 - Longitud de Fractura (Fraccion): [Empty]

At the bottom of the form, there are several buttons: "Agregar" (highlighted with a yellow box), "Acumulado", "Configurar Tubing", "Viscosidad Total Sistema", and "Cerrar". A "Calcular" button is also present near the output fields.

Figura 32. Ingreso de datos de tipo de completamiento.

Para finalizar, se programó la herramienta para que el usuario pueda ver, el acumulado de las pérdidas de viscosidad a través del sistema planteado, al oprimir el botón “Acumulado”, en el cual

el programa mostrara, cuanto se perdió en cada etapa del sistema, y así poder tener una mejor visión para el análisis de resultados. Figura 35.

The screenshot shows a software window titled "UserForm2" with the main heading "Shear Rate en Perforados". The interface is divided into several sections:

- Datos:**
 - Porosidad: 0,25
 - Permeabilidad (mD): 800
 - Caudal Inyección (Bls/día): 1000
 - Tipo de Completamiento: Perforated Well
- Datos de Entrada de Completamiento:**
 - Tipo de Perforaciones: Perforations Collapsed 90%
 - Tiros por Pie (SPF): 12
 - Longitud Completada (mts): 20
 - Diametro de Disparo (Pulg): 0,45
 - Profundidad de Penetración (Pulg): 19,95
 - Diametro de Pozo (Pulg): 7
 - Area Abierta (Fraccion):
 - Longitud de Fractura (Fraccion):
- Datos de Completamiento:**
 - Disparos Totales: 800
 - Area del Wellbore (m2): 18,8495559215388
 - Area Total de Tiro (m2): 0,865702244595498
 - Area de Inyeccion (m2):
 - Area de Fractura (m2):
 - Shear Rate: 6766,18058126642
 - % Viscosidad Perdida: 8,16597773074407
 - Viscosidad Final (cp): 20,0789874463787

At the bottom of the form, there is a "Calcular" button highlighted in yellow, and four other buttons: "Acumulado", "Configurar Tubing", "Viscosidad Total Sistema", and "Cerrar". An "Agregar" button is located at the bottom left.

Figura 33. Calculo de la perdida de viscosidad en el completamiento.

The image displays two sequential screenshots of a software application window titled 'UserForm3'. The window contains two input fields: '% Viscosidad Perdida' and 'Viscosidad Final (cp)'. Below these fields are three buttons: 'Calcular', 'Acumulado', and 'Cerrar'. In the top screenshot, the 'Calcular' button is highlighted with a yellow border. In the bottom screenshot, the 'Acumulado' button is highlighted with a yellow border, and the input fields contain numerical values. A green box highlights the input fields in the bottom screenshot.

Field	Value
% Viscosidad Perdida	8,73187524373334
Viscosidad Final (cp)	20,0789874463787

Figura 34. Calculo de la viscosidad final de todo el sistema.

UserForm5

Sistema

Accesorio 1	Tubería Configurada	Viscosidad Final 1	21,9991291590644
Accesorio 2	Válvula de compuerta de cuña Clase 150 NPS 1	Viscosidad Final 2	21,9020284248106
Accesorio 3	Codo de 90	Viscosidad Final 3	21,9011616466207
Accesorio 4	Conexión estándar en T Flujo directo	Viscosidad Final 4	21,9002949043748
Accesorio 5		Viscosidad Final 5	
Accesorio 6		Viscosidad Final 6	
Accesorio 7		Viscosidad Final 7	
Accesorio 8		Viscosidad Final 8	
Accesorio 9		Viscosidad Final 9	
Accesorio 10		Viscosidad Final 10	
		Viscosidad Final Tubing	21,8644321028511
		Viscosidad Final Perforados	20,078987463787

Figura 35. Pérdidas de viscosidad Acumuladas en todo el sistema configurado.