



Proyecto Integrador Profesional para optar por el título de Ingeniería en
Petróleo

**Diseño, construcción y validación de un equipo para el estudio
reológico en flujo de soluciones poliméricas.**

Autores

**Dayni A. Moreno
Braian M. Pacheco**

Directores

**Esteban L. González
Ricardo A. Prado**

**Universidad Nacional del Comahue
Ingeniería en Petróleo
Neuquén, Neuquén, Argentina
2024**

Resumen

El uso de polímeros en la industria hidrocarburífera goza de gran popularidad debido a los beneficios (aumento de la eficiencia de flujo, reducción en las pérdidas por fricción, reducción de la sedimentación, disminución de costos operativos, etc.) que se pueden conseguir mediante su incorporación (Ba Geri, Imqam, & Flori, 2019). Por lo tanto, es importante comprender el funcionamiento de este tipo de aditivos, identificar valores de concentración óptima y reconocer cómo influyen en las pérdidas por fricción para las distintas disposiciones de la tubería (recta y curva).

Con este propósito, se diseñó y construyó un equipo que permite medir las caídas de presión al fluir una solución polimérica a través de la tubería. El dispositivo se dividió en cuatro secciones diferentes, incluyendo un tramo recto y tres tramos enrollados en espiral, cada uno con distinta relación de curvatura que replican el efecto que se puede producir en un *coiled tubing*, simulando condiciones comunes en operaciones de campo. Dichas secciones fueron colocadas de manera consecutiva para formar un circuito que permite la toma de mediciones de presión a la entrada y salida de cada uno de los tramos.

Los resultados obtenidos muestran el porcentaje de reducción en las pérdidas por fricción para las distintas concentraciones en función del número de Reynolds. Además, se realiza un análisis reológico de la mezcla agua – polímero para caracterizar la solución, junto con ensayos de distinto tipo para conocer cómo la agitación y el reposo de la mezcla afectan a la degradación e hidratación de las soluciones poliméricas.

Abstract

The use of polymers in the hydrocarbon industry is widely popular due to the benefits (increased flow efficiency, reduction in friction losses, sediment reduction, lower operating cost, etc.) that can be achieved through their incorporation. Therefore, it is important to understand the functioning of this type of additives, identify optimal concentration values, and recognize how they influence friction losses for different piping arrangements (straight piping and curved sections).

To address this objective, a device was designed and built to measure pressure drops when flowing a polymeric solution through the pipeline. The apparatus was divided into four different sections, including a straight section and three spiral-wound sections, each with a different curvature ratio replicating the effect that can occur in coiled tubing, simulating common conditions in field operations. These sections were sequentially arranged to form a circuit allowing pressure measurements at the inlet and outlet of each loop.

The results obtained depict the percentage reduction in friction losses for different concentrations as a function of the Reynolds number. Additionally, a rheological analysis of the water-polymer mixture is conducted to characterize the solution. Various types of tests are performed to understand how over-agitation and resting of the mixture affect the degradation and hydration of the polymeric solutions.

Reconocimiento y dedicatoria

D. M.: Durante nuestra vida encontramos personas que vienen y se van, muchas de ellas dejan una gran huella sobre nosotros. En primer lugar, quiero agradecer a aquellas que ya no están, pero me dejaron una gran enseñanza e inspiración, mi tío, uno de ellos a quien llevo siempre su recuerdo a mi lado y a quien debo agradecerle haberme inculcado enormes valores. Agradezco también a mis padres y mis hermanos, que me acompañan siempre en mi camino, apoyándome en los momentos más difíciles y aconsejándome para salir adelante pese a la adversidad. En ellos descubrí el cariño más puro, y el motivo para levantarme cada mañana a enfrentar los desafíos diarios.

Por último, un agradecimiento inmenso a Ricardo y Esteban, directores de este proyecto, que desde el primer minuto se comprometieron con esta aventura y en muchas ocasiones tenían más entusiasmo que el mío con lo que fuimos construyendo. Agradezco enormemente su gran predisposición y enseñanzas para la vida.

B. P.: En principio agradezco a los directores de este proyecto, Esteban y Ricardo, por su gran predisposición y dedicación para con el mismo y el gran apoyo personal que han demostrado con nosotros. También agradecer a todo el personal del laboratorio de petróleo de la Universidad Nacional del Comahue quienes siempre estuvieron a disposición para atender cualquier necesidad que pudiéramos haber tenido durante la realización de los experimentos. En segundo lugar, agradezco a mi compañero de proyecto, Dayni, por permitirme formar parte de este proyecto en el cual él invirtió mucho tiempo y dedicación para su concreción.

Por último, pero no menos importante, agradecer a mis padres y hermanos por su incansable apoyo a lo largo no solo de este proyecto sino de toda mi carrera universitaria, siendo un apoyo moral y personal en todo momento. También a mi pareja quien ha sido mi compañera durante todo gran proyecto que ha sido la carrera universitaria. Finalmente agradecer a toda aquella persona que ha sido importante de alguna manera para la concreción tanto de este proyecto como durante el desarrollo de la carrera y también a la gran institución que es la Universidad Nacional del Comahue.

Contenido

Índice de figuras	7
Índice de Tablas	10
Introducción	12
Objetivos	13
1. Conceptos básicos de hidráulica y mecánica de los fluidos.	14
1.1. Propiedades de los fluidos.	14
1.1.1. Presión.....	14
1.1.2. Caudal.....	15
1.1.3. Perfil de velocidades.....	15
1.2. Número de Reynolds	15
1.2.1. Flujo Laminar	17
1.2.2. Flujo Turbulento	17
1.3. Viscosidad.....	17
1.3.1. Viscosidad Dinámica (μ)	18
1.3.2. Viscosidad Cinemática (ν).....	18
1.3.3. Fluido newtoniano.....	18
1.3.4. Fluido no newtoniano	19
1.4. Leyes Fundamentales de la Hidrodinámica.....	21
1.4.1. Ecuación de Continuidad.....	21
1.4.2. Ecuación de la Energía.....	21
1.5. Pérdidas de carga	23
1.5.1. Concepto	23
1.5.2. Causas y cálculo.....	23
1.6. Coeficiente de fricción.....	24
1.6.1. Concepto	24
1.6.2. Cálculo y su relación con las pérdidas de carga.....	24
1.6.3. Coeficiente de fricción para flujo laminar	25
1.6.4. Coeficiente de fricción para flujo turbulento.	25
2. Reductores de fricción.....	26
2.1. Polímeros como agentes reductores de fricción	27
2.1.1. Mecanismo de reducción de fricción	27
2.2. Uso de los reductores en operaciones de estimulación hidráulica.....	29
2.2.1. Reología de fluidos de soluciones poliméricas para estimulación hidráulica.	29
2.2.2. Tipos de fluidos de estimulación hidráulica.	30
3. Estudio reológico de soluciones poliméricas en flujo.	31

3.1.	Componentes, configuración y ensamble del equipo.....	32
3.2.	Purga del circuito.....	38
3.3.	Calibración de los sensores	40
3.4.	Desarrollo experimental.....	41
3.4.1.	Cálculo reológico para las distintas concentraciones.....	43
3.4.1.1.	Primer ensayo: Análisis de la reología.....	46
3.4.1.2.	Segundo ensayo: intervalos de tiempos en agitación.	55
3.4.1.3.	Tercer Ensayo: Estudio de las propiedades reológicas tras 24 horas en agitación.58	
3.4.1.4.	Cuarto ensayo: hidratación y degradación por tiempo.....	61
3.5.	Ensayo de circulación de fluidos para medir las pérdidas por fricción.	63
3.5.1.	Circulación con agua.....	64
3.5.2.	Circulación con soluciones poliméricas.....	68
3.5.2.1.	Solución polimérica de concentración 0,07%.....	70
3.5.2.2.	Solución polimérica de concentración 0,10%.....	74
3.5.2.3.	Solución polimérica de concentración 0,15%.....	79
3.6.	Reducción de pérdidas por fricción.....	81
4.	Conclusiones.....	86
	Bibliografía	95

Índice de figuras

Figura 1.1: Esfuerzos de corte actuando sobre un sólido (izq.) y un líquido (der.) (Guachún L. & Guzñay P, 2020).....	14
Figura 1.2: Líneas de flujo para régimen laminar (izq.) y turbulento (der.) (Fernández Osmá, 2019).	15
Figura 1.3: Efecto de los esfuerzos de corte sobre una partícula fluida para un fluido newtoniano. (White, 2004, pág. 22).....	19
Figura 1.4: gráfico de comportamiento reológico para las distintas clasificaciones. (White, 2004, pág. 28)	20
Figura 1.5: representación gráfica de conducto con sección variable. (Young & Freedman, 2009, pág. 467)	21
Figura 1.6: volumen de control entre dos secciones. (White, 2004, pág. 343)	22
Figura 2.1: moléculas de monómero y polímero. (Lifeder, 2022).	27
Figura 2.2: mecanismo de reducción de la fricción. (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022).....	28
Figura 2.3: partícula de poliacrilamida cross-linkada con cromo. (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022)	29
Figura 2.4: orientación de las cadenas poliméricas dependiendo de la velocidad de corte.	30
Figura 2.5: variación de la viscosidad para distintas concentraciones de polímero. (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022).	31
Figura 3.1: laboratorio departamento de geología y petróleo.	32
Figura 3.2: esquema del equipo de estudio reológico en flujo para polímeros.	33
Figura 3.3: relación de curvatura.	34
Figura 3.4: tubería flexible de acero inoxidable.....	35
Figura 3.5: espirales con las distintas relaciones de curvatura.....	36
Figura 3.6: tramo de tubería recta.	36
Figura 3.7: sensores de presión.	37
Figura 3.8: ensamble de las espirales de coiled tubing y tramo recto.	37
Figura 3.9: entrada al circuito en la parte de la tubería recta.	38
Figura 3.10: posición final del equipo.	38
Figura 3.11: conexión de sensores de presión al circuito.....	39
Figura 3.12: cabezal conector al sensor.	40
Figura 3.13: displays de lectura.	40
Figura 3.14: cables conectores de sensor-display.	40
Figura 3.15: conexión parte trasera del display.....	40
Figura 3.16: estructura química de la Poliacrilamida.	42
Figura 3.17: poliacrilamida usada en el laboratorio.....	42
Figura 3.18: volumen de agua.	44
Figura 3.19: balanza de precisión.	44
Figura 3.20: equipos usados para la preparación de la mezcla y mediciones reológicas: viscosímetro Fann (izq.), mezcladora Hamilton Beach (der).	45
Figura 3.21: proceso de mezclado agua-polímero: mezcla en preparación(izq.), mezcla preparada (der.).	46
Figura 3.22: selector de velocidad (izq.) y lectura del viscosímetro Fann (der.).....	47
Figura 3.23: gráfico de esfuerzos de corte (τ) en función de las velocidades de corte (γ) para una solución polimérica con una concentración de 0,15%.	49
Figura 3.24: gráfico de viscosidad aparente (μ_a) en función de la velocidad de corte (γ) para una solución polimérica con una concentración de 0,15%.	50
Figura 3.25: vórtice al momento de agregar el polímero.	51
Figura 3.26: vórtice 1 minuto, efecto Weissenberg.	51
Figura 3.27: gráfico de esfuerzos de corte (τ) en función de las velocidades de corte (γ) para las soluciones poliméricas de concentraciones 0,01%, 0,05%, 0,07% y 0,10%.	52

Figura 3.28: gráfico de viscosidad aparente (μ_a) en función de la velocidad de corte (γ) para las soluciones poliméricas de concentraciones 0,01%, 0,05%, 0,07% y 0,15%.	53
Figura 3.29: gráfico de esfuerzos de corte (τ) y velocidades de corte (γ) para las soluciones poliméricas.	54
Figura 3.30: gráfico de esfuerzo de corte (τ) vs velocidad de corte (γ) para el ensayo de intervalos de tiempo cada 15 minutos con una solución polimérica de concentración 0,15%.	57
Figura 3.31: gráfico de viscosidad aparente (μ_a) vs velocidad de corte (γ) para el ensayo de intervalos de tiempo cada 15 minutos con una solución polimérica de concentración 0,15%.	57
Figura 3.32: muestra de la solución polimérica de concentración 0,15% tras mantenerse en agitación por 24 horas.	58
Figura 3.33: valores de esfuerzo de corte (τ) vs velocidad de corte (γ) para una solución polimérica de concentración 0,15% en agitación durante 24 horas.	60
Figura 3.34: gráfico de viscosidad aparente (μ_a) vs velocidad de corte (γ) para una solución polimérica de concentración 0,15% en agitación durante 24 horas.	60
Figura 3.35: gráfico de esfuerzos de corte(τ) vs velocidad de corte (γ) para una solución polimérica de concentración 0,15% después de 72 horas en reposo.	62
Figura 3.36: gráfico de viscosidad aparente (μ_a) vs velocidad de corte (γ) para una solución polimérica de concentración 0,15% después de 72 horas en reposo.	62
Figura 3.37: esquema del interior de una bomba peristáltica. (Tecnoproducts, 2023).	64
Figura 3.38: medición de la presión para los distintos sensores en el tiempo de ensayo en el laboratorio con agua para caudales ascendentes.	65
Figura 3.39: medición de la presión en los sensores del circuito para los distintos caudales de circulación con agua.	66
Figura 3.40: caídas de presión para los tramos del circuito en función del número de Reynolds para la circulación con agua.	66
Figura 3.41: gráfico de factor de fricción de Fanning (ff) en función del número de Reynolds (Re) para la circulación con agua.	68
Figura 3.42: medición de la presión en los sensores del circuito para los distintos caudales de flujo con una solución polimérica de concentración 0,07%.	70
Figura 3.43: caídas de presión (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,07%.	72
Figura 3.44: factor de fricción de Fanning (ff) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica con una concentración de 0,07%.	74
Figura 3.45: medición de la presión en los sensores del circuito para los distintos caudales de flujo con una solución polimérica de concentración 0,10%.	75
Figura 3.46: caídas de presión (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,10%.	77
Figura 3.47: factor de fricción de Fanning (ff) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica con una concentración de 0,10%.	78
Figura 3.48: medición de la presión en los sensores del circuito para los distintos caudales de flujo con una solución polimérica de concentración 0,15%.	79
Figura 3.49: caídas de presión (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,15%.	80
Figura 3.50: factor de fricción de Fanning (ff) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica con una concentración de 0,15%.	81
Figura 3.51: factores de fricción de Fanning (ff) en régimen turbulento para las distintas soluciones en tubería recta.	82
Figura 3.52: factores de fricción de Fanning (ff) en régimen turbulento para las distintas soluciones en espiral 1 ($r/R = 0,010$).	83
Figura 3.53: factores de fricción en régimen turbulento para las distintas soluciones en espiral 2 ($r/R = 0,015$).	83
Figura 3.54: factores de fricción de Fanning (ff) en régimen turbulento para las distintas soluciones en espiral 3 ($r/R = 0,024$).	84
Figura 3.55: porcentaje de reducción de fricción (RF) para soluciones poliméricas en tubería recta.	86

<i>Figura 4.1: caídas de presión (ΔP) en función del caudal (q) sobre la tubería recta para las soluciones. ...</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.2: caídas de presión (ΔP) en función del caudal (q) sobre la espiral 1 ($r/R = 0,010$) para las soluciones.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.3: caídas de presión (ΔP) en función del caudal (q) sobre la espiral 2 ($r/R = 0,015$) para las soluciones.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.4: caídas de presión (ΔP) en función del caudal (q) sobre la espiral 3 ($r/R = 0,024$) para las soluciones.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.5: evidencia experimental de la transición en un flujo de agua por un tubo liso (White, 2004)...</i>	<i>89</i>
<i>Figura 4.6: caídas de presión del agua (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para la tubería recta.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.7: caídas de presión solución polimérica 0,07% (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para la tubería recta.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.8: caídas de presión solución polimérica 0,10% (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para la tubería recta.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4.9: caídas de presión solución polimérica 0,15% (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para la tubería recta.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4.10: reología de la solución polimérica de concentración 0,07% antes y después del flujo por el circuito.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4.11: reología de la solución polimérica de concentración 0,10% antes y después del flujo por el circuito.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4.12: reología de la solución polimérica de concentración 0,15% antes y después del flujo por el circuito.</i>	<i>93</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 3.1: características de la tubería.</i>	33
<i>Tabla 3.2: valores de relaciones de curvatura.</i>	34
<i>Tabla 3.3: lista y cantidad de elementos adicionales.</i>	35
<i>Tabla 3.4: rango de cada sensor en el circuito.</i>	41
<i>Tabla 3.5: valores de concentración de las soluciones poliméricas en % de peso en peso para los casos de estudio de reducción en las pérdidas por fricción.</i>	42
<i>Tabla 3.6: relaciones masa-volumen para las muestras usadas en el estudio reológico de las concentraciones.</i>	44
<i>Tabla 3.7: lectura viscosímetro Fann para el caso de una solución polimérica con una concentración de 0,15%.</i>	47
<i>Tabla 3.8: valores de esfuerzo de corte (τ) y velocidad de corte (γ) para una solución polimérica con una concentración de 0,15%.</i>	48
<i>Tabla 3.9: valores de viscosidad aparente (μ_a) para una solución polimérica con una concentración de 0,15%.</i>	50
<i>Tabla 3.10: lecturas en el viscosímetro Fann para las soluciones poliméricas con concentraciones 0,01%, 0,05%, 0,07% y 0,10%.</i>	51
<i>Tabla 3.11: valores de esfuerzos de corte (τ) y velocidades de corte (γ) para las soluciones poliméricas con concentraciones 0,01%, 0,05%, 0,07% y 0,10%.</i>	52
<i>Tabla 3.12: valores de viscosidad aparente (μ_a) para las soluciones poliméricas de concentraciones 0,01%, 0,05% 0,07% y 0,10%.</i>	53
<i>Tabla 3.13: valores del índice de consistencia (K) e índice de comportamiento (n) de la ley de la potencia para las soluciones poliméricas.</i>	54
<i>Tabla 3.14: lecturas en el viscosímetro Fann para el ensayo de intervalos de tiempo cada 15 minutos con una solución polimérica de concentración 0,15%.</i>	55
<i>Tabla 3.15: valores de esfuerzo de corte (τ) y velocidad de corte (γ) para el ensayo de intervalos de tiempo cada 15 minutos con una solución polimérica de concentración 0,15%.</i>	56
<i>Tabla 3.16: valores viscosidad aparente (μ_a) y velocidad de corte (γ) para el ensayo de intervalos de tiempo cada 15 minutos con una solución polimérica de concentración 0,15%.</i>	56
<i>Tabla 3.17: lectura sobre el viscosímetro Fann para una solución polimérica de concentración 0,15% durante 24 horas en agitación.</i>	59
<i>Tabla 3.18: valores de esfuerzos de corte (τ), velocidad de corte (γ) y viscosidad aparente (μ_a) para una solución polimérica de concentración 0,15% en agitación durante 24 horas.</i>	59
<i>Tabla 3.19: lectura viscosímetro Fann para una solución polimérica con una concentración de 0,15% después de 72 horas en reposo.</i>	61
<i>Tabla 3.20: valores de esfuerzo de corte (τ), velocidad de corte (γ) y viscosidad aparente (μ_a) para una solución polimérica después de 72 horas en reposo.</i>	61
<i>Tabla 3.21: valores de caudal, velocidad, caídas de presión (ΔP), número de Reynolds (Re) y factor de fricción de Fanning (ff) para la circulación con agua.</i>	68
<i>Tabla 3.22: valores de números de Reynolds críticos para las soluciones poliméricas de concentraciones 0,07%, 0,10% y 0,15%.</i>	69
<i>Tabla 3.23: valores de caudal (Q), viscosidad aparente (μ_a) y número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,07%.</i>	71
<i>Tabla 3.24: valores de caídas de presión (ΔP), número de Reynolds (Re) y factor de fricción de Fanning (ff) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,07%.</i>	73
<i>Tabla 3.25: valores de caudal (Q), viscosidad aparente (μ_a) y número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,10%.</i>	76
<i>Tabla 3.26: valores de caídas de presión (ΔP), número de Reynolds (Re) y factor de fricción de Fanning (ff) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,10%.</i>	78
<i>Tabla 3.27: valores de caudal (Q), viscosidad aparente (μ_a) y número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,15%.</i>	79

Tabla 3.28: valores de caídas de presión (ΔP), número de Reynolds (Re) y factor de fricción de Fanning (ff) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,15%. 80

Tabla 3.29: porcentaje de reducción de pérdidas por fricción (RF) en tubería recta mediante el uso de soluciones poliméricas de concentraciones 0,07% y 0,10%. 85

Introducción

Las pérdidas por fricción representan el principal gasto energético al transportar cualquier fluido por una tubería horizontal o con poca inclinación, especialmente en la industria del petróleo y gas, donde se requiere bombear grandes cantidades de fluido. Esto implica un gran desafío, ya que las operaciones deben ser rentables para que se pueda llevar a cabo su ejecución. Por lo tanto, es crucial reducir las pérdidas de carga debido a la fricción y así disminuir el gasto energético.

Para comprender la importancia de cómo afectan las pérdidas por fricción, consideremos el escenario de una estimulación hidráulica, donde se bombean grandes cantidades de fluido a profundidades considerables y con una presión extremadamente alta para formar la fractura. Este proceso implica un considerable gasto energético, y se vuelve esencial reducir lo máximo posible las pérdidas de presión para que la operación pueda ser ejecutable. Es aquí donde entra en juego el uso de los polímeros, ya que al disminuir las pérdidas permite reducir la potencia para movilizar el fluido o aumentar los caudales transportados.

En este proyecto se estudia de manera experimental el efecto de un polímero al ser adicionado en agua, como afectan los valores de concentración de la solución polimérica y sus propiedades reológicas. Además, se analizan los mecanismos mediante los cuales los polímeros influyen sobre el flujo para reducir las pérdidas, considerando también en el diseño del equipo el estudio del efecto tanto sobre un tramo recto como sobre tuberías enrolladas, donde las curvaturas de estas últimas generan flujos secundarios que pueden aumentar las pérdidas de carga.

Objetivos

Objetivo general

Estudiar los efectos de un polímero utilizado en la industria del petróleo para disminuir las pérdidas de carga en el sistema, para lo cual se diseñará y construirá un equipo que permita el estudio reológico de soluciones poliméricas en flujo, aplicando los conceptos aprendidos a lo largo de la carrera de ingeniería en petróleo.

Objetivos específicos

- Revisión bibliográfica de los conceptos fundamentales de la mecánica de fluidos y la aplicación de los reductores de fricción en la industria del petróleo.
- Diseño y construcción de un equipo para la evaluación del comportamiento reológico de una solución polimérica en flujo.
- Diseño y realización de experimentos para evaluar la reología de una solución polimérica.
- Elaboración de recomendaciones y conclusiones sobre el efecto de la adición de polímeros para la disminución de las pérdidas de carga en la industria del petróleo, y su posible aplicación en diferentes escenarios y condiciones.

1. Conceptos básicos de hidráulica y mecánica de los fluidos.

Comprender los efectos hidráulicos involucrados cuando un fluido entra en movimiento es importante para entender el fenómeno de las pérdidas debido a la fricción, además de conceptos fundamentales tales como la viscosidad y la turbulencia.

También resulta necesario conocer las expresiones que gobiernan el estudio reológico, tanto teóricas como experimentales, así como su aplicación al análisis que se llevará a cabo en el presente proyecto.

1.1. Propiedades de los fluidos.

En el contexto de la mecánica de fluidos, un fluido se puede definir como una sustancia que no ofrece resistencia a los esfuerzos de corte o tangenciales (White, 2004). Pueden ser por ejemplo líquidos o gases, y presentan propiedades que son importantes para su estudio, tales como viscosidad, densidad, etc.

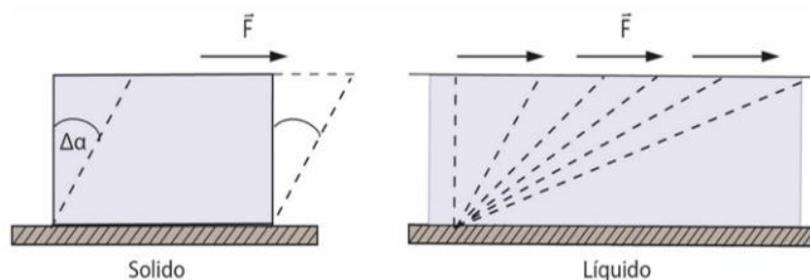


Figura 1.1: Esfuerzos de corte actuando sobre un sólido (izq.) y un líquido (der.) (Guachún L. & Guñay P., 2020)

1.1.1. Presión

Se puede definir a la presión como una fuerza (F) aplicada sobre una unidad de área (A). Ésta juega un papel fundamental sobre todo para este estudio, ya que influye en el comportamiento del flujo, en su velocidad y dirección de movimiento debido a las diferencias de presión (AtlasScientific, 2023).

La unidad en el sistema internacional es el Pascal (Pa), que se define como un Newton por metro cuadrado (N/m^2), pero habitualmente se puede encontrar expresada en

atmósferas (atm). En la industria del Oíl & Gas se utiliza ampliamente la unidad de libra por pulgada cuadrada (psi). Los valores equivalentes son $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 14,7 \text{ psi}$.

1.1.2. Caudal

El caudal volumétrico se define como la cantidad de volumen de un fluido que fluye a través de una sección determinada en un periodo de tiempo.

Se expresa en unidades de volumen (V) por unidad de tiempo (t), por ejemplo, litros por segundo (l/s) o metros cúbicos por segundo (m^3/s)

$$Q = vA \quad [\text{Ec. 1}]$$

donde:

Q: caudal volumétrico

v: velocidad media

A: sección o área transversal.

1.1.3. Perfil de velocidades

Se refiere a la distribución de la velocidad de un fluido en función de su posición dentro de un conducto o una corriente, describiendo como cambia la velocidad a lo largo de una dirección específica, generalmente transversal a la del movimiento. En general, para los cálculos de número de Reynolds se suele usar un valor de velocidad promedio.

1.2. Número de Reynolds

El número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional que indica o predice cual será el comportamiento del flujo. Clasificándolo en flujo laminar, de transición o turbulento.

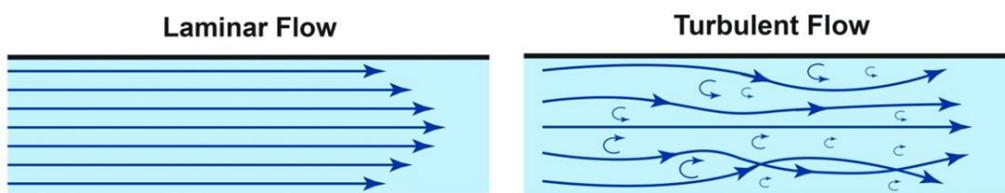


Figura 1.2: Líneas de flujo para régimen laminar (izq.) y turbulento (der.) (Fernández Osma, 2019).

En el caso de las tuberías, la clasificación de los regímenes de flujo para un fluido newtoniano, se aceptan los siguientes valores de número de Reynolds (Re) como límites para el cambio de régimen (White, 2004):

- Régimen laminar, $Re < 2300$
- Régimen de transición, aproximadamente $2300 < Re < 4200$
- Régimen turbulento, $Re > 4200$

Como consideración, el régimen de transición se puede obviar, para algunos autores a partir de los 2300 ya se considera flujo turbulento. Siendo este valor el que demarca el umbral de transición de régimen laminar a turbulento para un fluido newtoniano y se conoce como número de Reynolds crítico (Re_c).

Para el caso de los fluidos no newtonianos, el valor de número de Reynolds crítico (Re_c) depende de las variables de la ley de la potencia (sección 1.3.4). En el caso práctico del presente proyecto, se calculará el valor de Reynolds crítico para cada solución polimérica. Además, no se considerará el régimen de transición. De presentarse valores de números de Reynolds mayores al crítico, se tomará como flujo turbulento.

La fórmula para calcular el número de Reynolds (Ec. 2), se puede interpretar como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en el fluido, y deja en evidencia que el tipo de flujo del fluido depende de la geometría, la velocidad y las propiedades del mismo (Fernández Osma, 2020)

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad [Ec. 2]$$

donde:

ρ : densidad

v : velocidad media

D : diámetro interno del sistema o conducto

μ : viscosidad.

1.2.1. Flujo Laminar

Se define al flujo laminar como aquel en el que sus líneas de flujo son paralelas entre sí, es decir, no se cortan entre ellas, presentando un movimiento a lo largo de trayectorias suaves y predecibles. En el caso de una tubería circular, su perfil de velocidades es parabólico con la velocidad máxima sobre el centro.

1.2.2. Flujo Turbulento

En el caso del régimen turbulento, las líneas de flujo son irregulares y caóticas, tal como se observa en la figura 1.2, tienen fluctuaciones impredecibles y componentes de velocidad perpendiculares a la dirección principal de movimiento, dándose la posibilidad que las líneas se corten entre sí.

Debido a esta variación de movimiento, el flujo turbulento presenta una mayor resistencia a fluir, lo que resulta en una gran disipación de energía, producto de los choques de partículas entre sí y con las paredes del conducto, estos impactos resultan en mayores fuerzas de fricción y contribuyen a la pérdida de energía.

1.3. Viscosidad

La viscosidad es una propiedad que se puede definir en términos simples como la resistencia de un fluido a fluir. Se puede entender más concretamente como la medida de la velocidad de deformación del fluido cuando se le aplica una fuerza tangencial. (White, 2004). Puede ser constante o variar conforme se hacen presentes las fuerzas tangenciales, a esto se le conoce como fluido newtoniano y no newtoniano, respectivamente.

Todos los fluidos poseen viscosidad debido a las interacciones y colisiones de sus partículas al moverse a distintas velocidades, generando una fricción interna. Para medirla se puede emplear el uso de instrumentos como un viscosímetro o un reómetro. Es importante destacar que se miden diferentes tipos de viscosidad, como la dinámica o la cinemática.

1.3.1. Viscosidad Dinámica (μ)

Se puede definir como la resistencia del fluido a fluir debido a la fricción interna entre sus capas. Se conoce también como viscosidad absoluta y se expresa en unidades que relacionan dimensiones de esfuerzo y tiempo. En el sistema internacional se utiliza el **Pascal segundo** (Pa·s), o lo que es equivalente el kilogramo por metro segundo (1 Kg/m·s). Mientras que en el sistema cgs la unidad utilizada es el Poise (1 g/cm·s), y comúnmente se utiliza un submúltiplo que es el **centiPoise** (cP).

1.3.2. Viscosidad Cinemática (ν)

La viscosidad cinemática, también conocida como viscosidad específica, se define como la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido, se mide en unidades de metro cuadrado por segundo (m^2/s) o Stokes (St).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [Ec. 3]$$

1.3.3. Fluido newtoniano

Es aquel en el cual su viscosidad se mantiene constante al aplicar fuerzas tangenciales. Desde el punto de vista físico representa una linealidad entre los esfuerzos de corte y la velocidad de deformación.

Si se realiza un análisis detallado de lo que ocurre a una partícula fluida sometida a un esfuerzo cortante (τ) en un plano, el ángulo de deformación ($\delta\theta$) aumenta continuamente con el tiempo mientras actúa τ , por lo cual se puede afirmar que son proporcionales entre sí (Ec. 4).

$$\tau \propto \frac{\delta\theta}{\delta t} \quad [Ec. 4]$$

Además, la superficie superior presenta una velocidad δu mayor que la inferior.

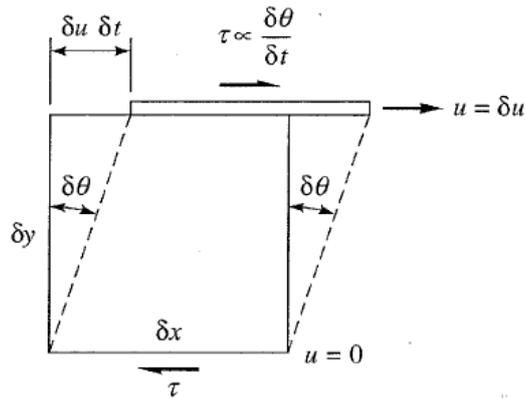


Figura 1.3: Efecto de los esfuerzos de corte sobre una partícula fluida para un fluido newtoniano. (White, 2004, pág. 22)

Si se realiza un análisis geométrico a partir de la figura 1.3 y se agrega una constante de proporcionalidad para poder obtener la igualdad, resulta que (White, 2004, pág. 23):

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{du}{dy} \quad [Ec. 5]$$

La constante de proporcionalidad es el **coeficiente de viscosidad** (μ), y es consistente con lo visto anteriormente, ya que tiene dimensiones de esfuerzo – tiempo.

1.3.4. Fluido no newtoniano

Si la viscosidad varía, es decir, no se mantiene constante (Ec. 6) al aplicar distintos esfuerzos tangenciales, se trata entonces de un fluido no newtoniano.

$$\mu \neq cte \quad [Ec. 6]$$

Estos fluidos no cumplen con la ley de linealidad vista en la Ec. 5, en otras palabras, la relación entre los esfuerzos de corte y velocidad de deformación no es lineal, y el comportamiento va a depender del tipo de fluido y del esfuerzo de corte aplicado. A continuación, se detalla la clasificación dependiendo de cómo varía la viscosidad (figura 1.4):

- **Fluido dilatante:** la viscosidad aumenta al aumentar los esfuerzos de corte.
- **Fluido pseudoplástico:** la viscosidad disminuye al aumentar los esfuerzos de corte.
- **Plástico:** si el efecto en los pseudoplásticos es muy importante se le denomina plástico.

- **Plástico de Bingham:** este tipo de fluidos se caracteriza porque es necesario aplicar una fuerza de corte inicial para que fluya, este valor se conoce como límite de fluencia.

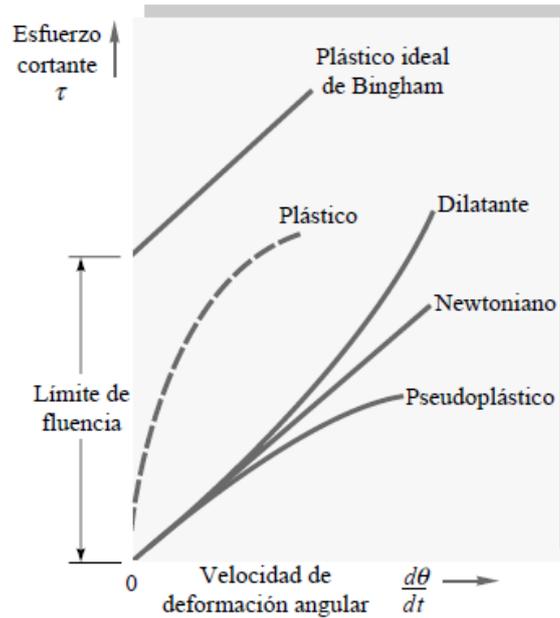


Figura 1.4: gráfico de comportamiento reológico para las distintas clasificaciones. (White, 2004, pág. 28)

Estos fluidos se ajustan a modelos reológicos para representar su comportamiento en los que el esfuerzo de corte (τ) depende únicamente de la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$). Para el caso del presente proyecto, únicamente se hará enfoque a la ley de la potencia, ya que las soluciones poliméricas con las que se experimenta se ajustan a este modelo (sección 3.4.1).

- **Ley de la potencia:** representa el comportamiento de fluidos dilatantes o pseudoplásticos, dependiendo del valor de K (índice de consistencia) y n (índice de comportamiento).

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad [Ec. 7]$$

K y n representan parámetros empíricos, donde K es el índice de consistencia y n el de comportamiento. Si $n < 1$ se denomina al fluido como pseudoplástico, presentando mayor facilidad a fluir a medida que la velocidad de deformación aumenta. Por el contrario, si $n > 1$ se trata de un fluido dilatante, el cual incrementa la resistencia al flujo conforme lo hace la velocidad de deformación. (Chhabra & Richardson, 1999)

1.4. Leyes Fundamentales de la Hidrodinámica

La hidrodinámica se encarga del estudio de los fluidos en movimiento, y las fuerzas que interactúan con este, tanto interna como externamente, incluyendo el efecto de parámetros como la velocidad, el caudal, la presión y la pérdida de energía.

1.4.1. Ecuación de Continuidad

Para el caso experimental presente, la ecuación de continuidad se desarrolla de una manera simplificada, partiendo de la suposición que el sistema se encuentra en estado estacionario, no acumula ni libera masa y los fluidos de trabajo (soluciones poliméricas) son incompresibles (figura 1.5). Bajo estas condiciones, la ecuación de continuidad se expresa como se muestra en la Ec. 8 (Young & Freedman, 2009, pág. 467).

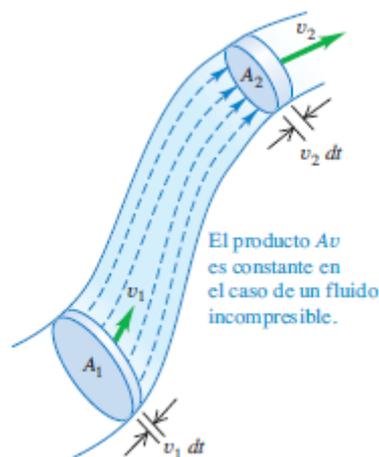


Figura 1.5: representación gráfica de conducto con sección variable. (Young & Freedman, 2009, pág. 467)

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad [Ec. 8]$$

1.4.2. Ecuación de la Energía

Para estudiar el efecto de los polímeros y su influencia en las pérdidas por fricción es importante considerar que estas se tratan de una pérdida de energía, por lo que su análisis parte de la ecuación de la energía, no solo para llegar a la expresión matemática correspondiente, sino también para comprender las distintas variables que intervienen en este fenómeno.

Inicialmente, se parte de la primera ley de la termodinámica, la cual se combina con lo que se conoce como el teorema de transporte de Reynolds enfocándose en un volumen de control específico (figura 1.6).

Considerando el caso particular en que el flujo es estacionario e incompresible, la tubería tiene una sección transversal constante, y no se añade ni extrae energía del sistema debido a bombas o turbinas (White, 2004, pág. 342).

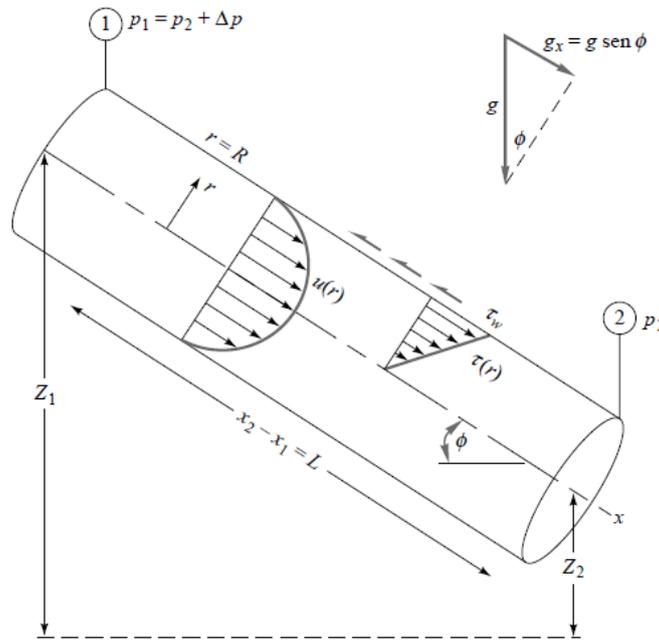


Figura 1.6: volumen de control entre dos secciones. (White, 2004, pág. 343)

Se toman dos puntos, entrada y salida para el volumen de control de la figura 1.6, y finalmente bajo las consideraciones mencionadas se obtiene la ecuación de la energía (Ec. 9)

$$\left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \right)_{ent} = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \right)_{sal} + h_{fricción} \quad [Ec. 9]$$

donde:

P : presión

ρ : densidad del fluido

g : aceleración debido a la gravedad

v : velocidad media

z : altura de referencia

$h_{fricción}$: pérdidas de energía debido a la fricción.

1.5. Pérdidas de carga

1.5.1. Concepto

Las pérdidas de carga en una tubería se refieren a la disminución de la presión de un fluido a causa de la fricción entre sus partículas y con las paredes del conducto, en otras palabras, se efectúa una pérdida de energía en el flujo a través de la tubería. (Arco, 2019)

1.5.2. Causas y cálculo

Las causas de las pérdidas de carga pueden ser múltiples, factores como la viscosidad, la velocidad del fluido, la rugosidad de las paredes del conducto y su longitud, además de los cambios de dirección que puedan existir en el trayecto.

En la ecuación de la energía (Ec. 9) aparece un término referente a las pérdidas por fricción ($h_{fricción}$).

Como se considera que el fluido es incompresible y la sección es constante, operando la ecuación de la energía (Ec. 9) se obtiene (White, 2004, pág. 343):

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta Z \quad [Ec. 10]$$

Se observa que la pérdida de carga es igual a la suma de las variaciones de presión y altura.

Si ahora, al caso se le aplica la ecuación de cantidad de movimiento, considerando que las fuerzas aplicadas son las de presión, gravedad y fricción en la pared. La ecuación queda como (White, 2004, pág. 343):

$$h_f = \frac{4\tau_w L}{\rho g d} \quad [Ec. 11]$$

Con lo cual, se observa que la pérdida de carga es proporcional al esfuerzo de corte en la pared del tubo y a la relación L/d que son propiedades del conducto.

Esta expresión fue trabajada para poder correlacionar las pérdidas de carga en problemas de flujo en conductos por el alemán Julius Weisbach. Obteniendo una ecuación empírica conocida como **ecuación de Darcy – Weisbach** (Ec. 12) que relaciona las pérdidas de carga debido a la fricción a lo largo de la tubería con la velocidad media del flujo. (White, 2004).

$$h_f = f \frac{L v^2}{d 2g} \quad [Ec. 12]$$

Donde f se denomina **coeficiente de fricción de Darcy**

1.6. Coeficiente de fricción

1.6.1. Concepto

Se trata de un parámetro adimensional utilizado en la ecuación de Darcy – Weisbach (Ec. 12) denominado como coeficiente de fricción de Darcy o simplemente coeficiente de fricción (f). En ocasiones se puede encontrar también con el nombre de **factor de fricción de Fanning** el cual es una cuarta parte del coeficiente de Darcy. El factor de fricción de Fanning (ff) se utiliza para el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías debido a la fricción, y se puede definir como una medida de la resistencia al flujo que experimenta un fluido en un conducto.

1.6.2. Cálculo y su relación con las pérdidas de carga

El coeficiente de fricción depende del número de Reynolds y de la forma y propiedades del conducto.

$$f \left(Re, \frac{\epsilon}{d}, \text{forma del conducto} \right)$$

Donde ϵ es la rugosidad del conducto y es importante para flujos en régimen turbulento (no se considera para régimen laminar).

Según indica el libro de “Mecánica de los fluidos (White, 2004)”, se puede obtener una expresión para el coeficiente de fricción (f) igualando las ecuaciones 11 y 12:

$$h_f = \frac{4\tau_w L}{\rho g d} = f \frac{L v^2}{d 2g}$$

Se despeja el factor de fricción de Darcy (f) y se obtiene la expresión para el coeficiente de fricción, resultando como:

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho v^2} \quad [Ec. 13]$$

1.6.3. Coeficiente de fricción para flujo laminar

En el caso de un flujo laminar completamente desarrollado y para un fluido newtoniano, se puede operar para obtener una solución analítica válida para este flujo (*Ec. 14*) (White, 2004, pág. 344)

$$f = \frac{64}{Re} \quad [Ec. 14]$$

donde Re es el número de Reynolds.

Se observa que para este caso el coeficiente de fricción es inversamente proporcional al número de Reynolds.

1.6.4. Coeficiente de fricción para flujo turbulento.

Para régimen en flujo turbulento, la relación entre el coeficiente de fricción con el número de Reynolds toma mayor complejidad. Lo más apropiado para este caso es utilizar correlaciones para poder dar con la solución.

Para llegar a una expresión general se utiliza una ley logarítmica que se considera que representa el perfil de velocidad media a través del conducto, mediante integración logarítmica se llega a la relación para el flujo turbulento en conductos (*Ec. 15*) (White, 2004, pág. 357).

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot f^{1/2}} \right) \quad [Ec. 15]$$

Esta ecuación es conocida como **ecuación de Colebrook – White**, y su campo de aplicación también abarca la zona de transición entre laminar y turbulento para un fluido newtoniano. Para el caso particular de tuberías lisas, el valor de la rugosidad relativa (ε/D) es muy pequeño, por lo que puede despreciarse quedando la ecuación como:

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 2 \log \left(Re \cdot f^{1/2} \right) - 0,8 \quad [Ec. 16]$$

2. Reductores de fricción

Los polímeros como agentes reductores de fricción se utilizan desde mediados del año 1950 debido a su capacidad para reducir las pérdidas de energía por fricción, actuando en la turbulencia cercana a la pared, directamente sobre los vórtices. (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022).

Cabe resaltar que únicamente son efectivos en flujo turbulento, debido a que en régimen laminar para disminuir las pérdidas es necesario modificar las propiedades del fluido (LiquidPower Specialty Products Inc, 2024).

Dependiendo del tipo de operación (perforación, terminación, transporte, etc.) que se lleve a cabo se obtendrán distintos beneficios, entre ellos se destacan (LiquidPower Specialty Products Inc, 2024):

- Aumentan la capacidad de transporte de las tuberías sin modificar la infraestructura ni los equipos de bombeo.
- Disminuyen los costos operativos y el consumo de energía al reducir la necesidad de estaciones de bombeo adicionales.
- Mejoran la calidad y la pureza de los productos al evitar la formación de depósitos y emulsiones en las paredes internas de las tuberías.
- Son compatibles con distintos tipos de petróleo crudo, desde livianos hasta pesados, y con productos refinados como gasolina y diésel.

2.1. Polímeros como agentes reductores de fricción

Los polímeros son macromoléculas con alto peso molecular constituidas por muchas unidades pequeñas conocidas como monómeros, se unen a través de enlaces covalentes formando las moléculas de polímeros.

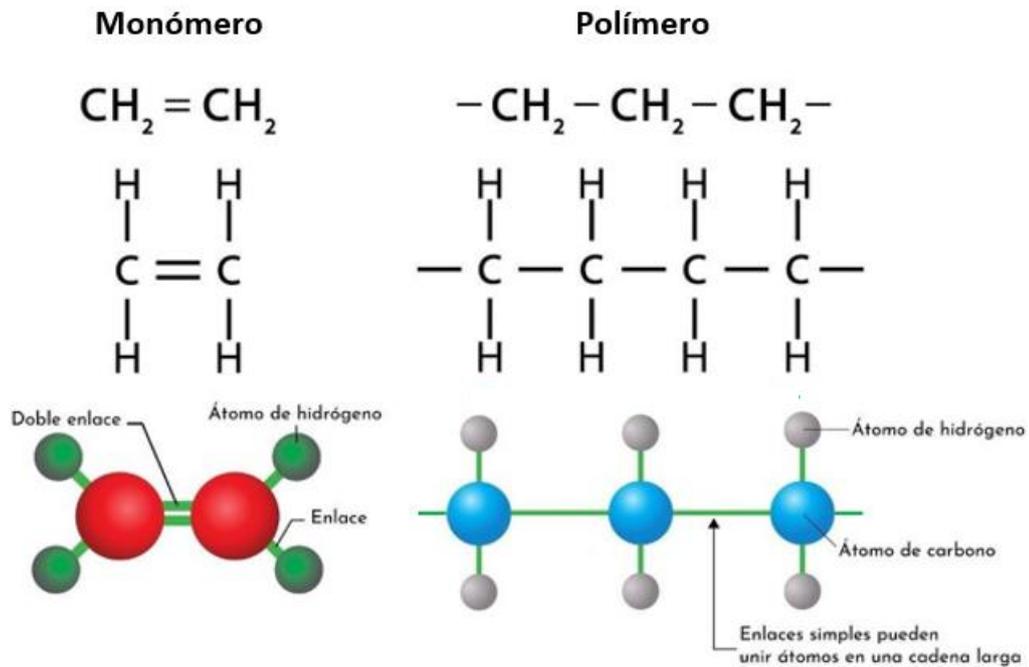


Figura 2.1: moléculas de monómero y polímero. (Lifeder, 2022).

Al formarse cadenas moleculares más largas, estas van tendiendo a doblarse o enrollarse aleatoriamente y se pueden entrecruzar entre sí generando un aumento de la viscosidad, esto hace que muchas veces que el fluido tenga comportamiento no newtoniano (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022).

2.1.1. Mecanismo de reducción de fricción

Los movimientos desorganizados que se presentan en el régimen turbulento, generan vórtices y movimientos aleatorios que resultan en una fricción excesiva y, por lo tanto, en un consumo de energía en la pared de la tubería. Por lo tanto, los reductores de fricción en cierta medida pueden considerarse como inhibidores de turbulencia, disminuyendo las pérdidas provocadas por los efectos turbulentos.

El mecanismo de reducción ha sido estudiado por diversos autores, los cuales dan una definición aproximada de cómo es el funcionamiento de este fenómeno. Dos de las

explicaciones más aceptadas son las propuestas por los autores John L. Lumley (1969) y Pierre G. De Gennes (1990):

- **Lumley:** la elongación de las moléculas poliméricas genera un aumento de la subcapa viscosa, amortiguando los vórtices generados por la turbulencia, como resultado se obtiene una menor pérdida de energía (Sher & Hetsroni, 2008).
- **De Gennes:** debido a la alta elasticidad del polímero, este puede absorber gran parte de la energía que generan las ondas de los vórtices para así disminuir las caídas de presión en la tubería (Sher & Hetsroni, 2008).

Basándose en las definiciones anteriores, se puede sugerir que el mecanismo de reducción de las pérdidas se debe al comportamiento viscoelástico de la solución polimérica, ya que, debido a la extensión molecular, las moléculas de polímero fuera de la subcapa viscosa tienen la capacidad de expandirse, resultando en el aumento de espesor de esta capa, lo que a su vez reduce la velocidad cercana a la pared.

Además, los fluidos con alta energía elástica cerca de la pared son transportados y empujados por el vórtice contra esta. Cuando el tiempo de relajación es lo suficientemente pequeño, las partículas poliméricas liberan la energía elástica antes de alcanzar la subcapa viscosa. En contraste, si el tiempo de relajación es lo suficientemente largo, la energía elástica generada por la energía cinética llegará a la subcapa viscosa liberándose en ella, lo que provocará que la turbulencia se debilite cerca de la pared (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022).

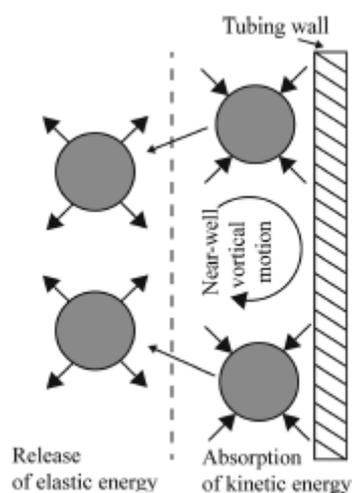


Figura 2.2: mecanismo de reducción de la fricción. (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022).

2.2. Uso de los reductores en operaciones de estimulación hidráulica.

El polímero es un aditivo muy importante en las operaciones de estimulación de pozos no convencionales. Su uso es indispensable para poder llevar a cabo la intervención, no solo por el hecho de disminuir las pérdidas de presión, sino también debido al manejo que se puede lograr del agente sostén, ya que los fluidos con adición de estos productos confieren un buen transporte y flotabilidad del *proppant* (agente sostén), dando como resultado un mejor empaquetamiento del volumen estimulado, y obteniendo una mayor productividad al momento de realizar la operación (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022).

Los polímeros usados en la estimulación hidráulica son polímeros de alto peso molecular, los cuales son poliacrilamidas que, desde el punto de vista reológico, se caracterizan por ser fluidos viscoelásticos. Se utilizan de dos formas como geles lineales (reductores de fricción) y geles *cross-linkados* (medio de transporte para el *proppant*) (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022).

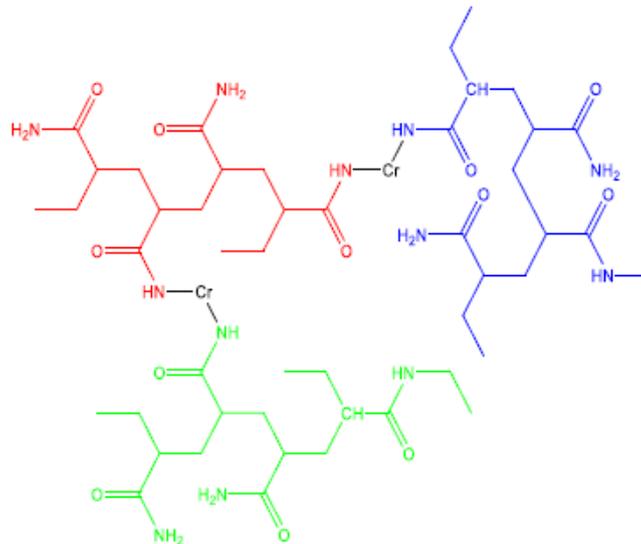


Figura 2.3: partícula de poliacrilamida *cross-linkada* con cromo. (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022)

2.2.1. Reología de fluidos de soluciones poliméricas para estimulación hidráulica.

Una solución polimérica generalmente tiene características no newtonianas y viscoelásticas, con lo cual, si las velocidades de corte tienden a ser nulas (sistema

estático), las cadenas del polímero tienden a entrecruzarse alcanzando su máximo valor de viscosidad.

Al momento de incrementarse las velocidades de corte, las macromoléculas tienden a orientarse con el flujo, lo cual hace que vaya disminuyendo su viscosidad hasta llegar a un valor mínimo donde la viscosidad ya no varía con el aumento de la velocidad de corte (Las conclusiones sobre la reología de las soluciones poliméricas son obtenidas tras una búsqueda bibliográfica y bajo consulta con la especialista del área de la Facultad de Ingeniería - UNComa).

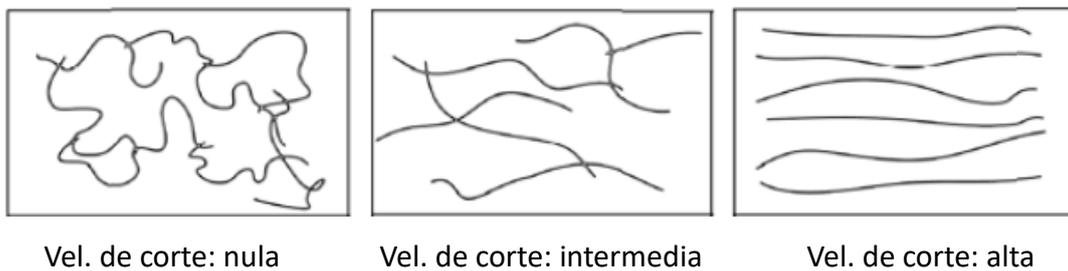


Figura 2.4: orientación de las cadenas poliméricas dependiendo de la velocidad de corte.

2.2.2. Tipos de fluidos de estimulación hidráulica.

Los fluidos de estimulación hidráulica se elaboran a partir de la adición de diversos componentes según su aplicación, pueden ser desde fluidos base agua con poca o alta viscosidad o con base en otro tipo de fluidos. La versatilidad que tiene el polímero en estos casos, es que dependiendo de la cantidad que se adicione se puede obtener los distintos tipos de fluidos para las etapas de bombeo.

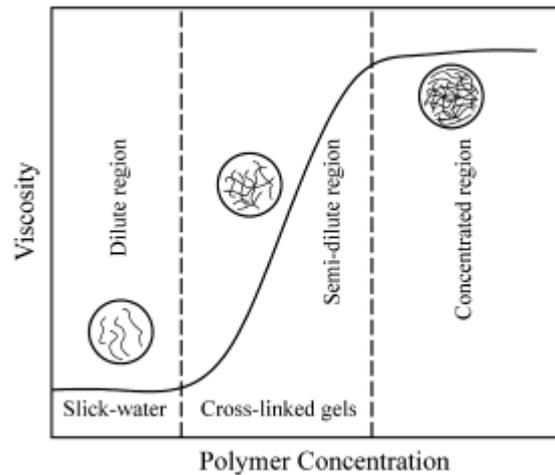


Figura 2.5: variación de la viscosidad para distintas concentraciones de polímero. (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022).

En el caso de los *slickwater* el polímero se encuentra altamente diluido, por lo que su concentración es muy baja. Suele ser un fluido base agua con adición de pocos aditivos químicos y en ocasiones muy poco agente sostén. Para concentraciones mayores (semi-diluidas) se obtiene *geles cross-linkeados*, donde la adición de polímero además de proporcionar una mayor viscosidad, mantiene sus ventajas como reductor de fricción, además, permite tener una mayor flotabilidad del agente sostén, logrando una mejor distribución dentro de la fractura (Sameer, Berihun, Md Motiur, Mohammed, & Tareq, 2022).

3. Estudio reológico de soluciones poliméricas en flujo.

Aunque el fenómeno físico que explica cómo actúan los polímeros como agentes reductores de fricción es difícil de determinar, mediante estudios experimentales se puede obtener información importante para su aplicación. Por ejemplo, como varía su efecto según las condiciones de diseño de la tubería, los cambios en las pérdidas de presión para diferentes concentraciones, etc.

En este proyecto se diseña un equipo que consiste en una serie de tuberías que representan situaciones que pueden encontrarse durante las operaciones, incluyendo tramos de tubería recta y otros afectados por curvaturas, simulando los efectos que pueden encontrarse en un *coiled tubing*, permitiendo obtener resultados reales sobre los efectos de los polímeros.



Figura 3.1: laboratorio departamento de geología y petróleo.

3.1. Componentes, configuración y ensamble del equipo.

El equipo se compone de cuatro tramos de tubería con un diámetro nominal (diámetro externo) de $\frac{1}{4}$ de pulgada, distribuida en un tramo recto y tres tramos configurados con distintos valores de curvatura conectados en serie. Cada punto intermedio lleva un sensor de presión para poder conocer los valores de presión a la entrada y salida de cada tramo. Además, se complementa con un tanque de descarga y una bomba peristáltica que permite obtener distintos valores de caudal, y así poder analizar el efecto de las diferentes concentraciones de polímero dependiendo del valor de número de Reynolds. La figura 3.2 ilustra la configuración del dispositivo.

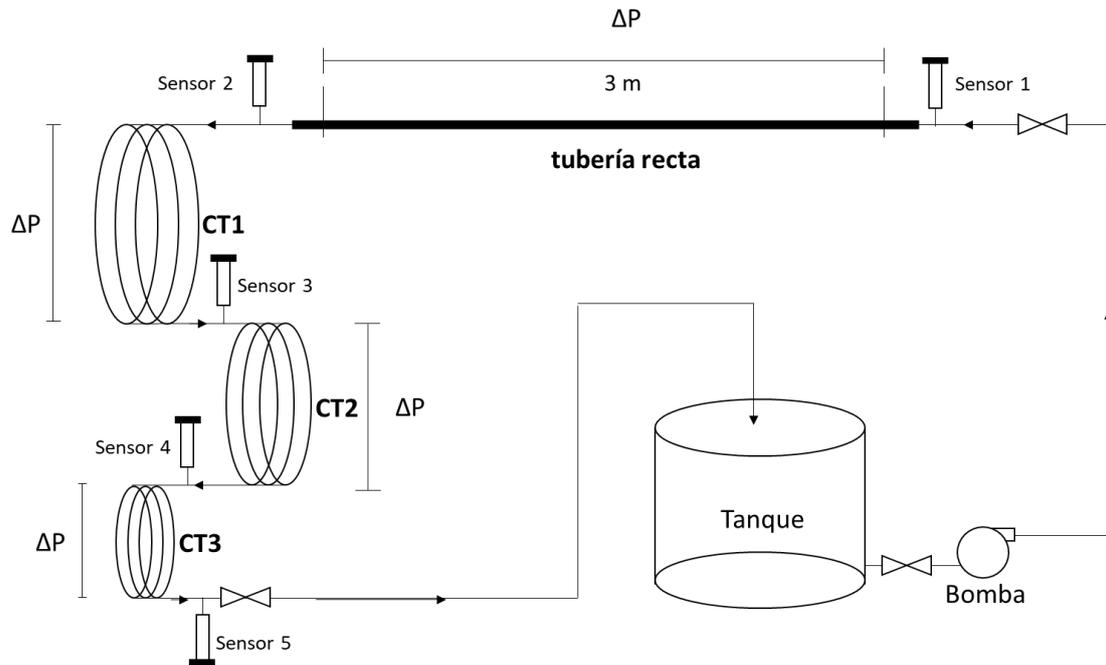


Figura 3.2: esquema del equipo de estudio reológico en flujo para polímeros.

En la tabla 3.1 se presenta en detalle las características de los tramos de tubería usados para el montaje del equipo.

Tabla 3.1: características de la tubería.

Tipo	Material	Diámetro externo (OD)		Diámetro interno (ID)		Long. [m]
		[in]	[cm]	[in]	[cm]	
Tubería Recta (TR)	Acero Inoxidable	0,25	0,635	0,166	0,422	3,2
Coiled Tubing 1 (CT1)	Acero Inoxidable	0,25	0,635	0,166	0,422	4
Coiled Tubing 2 (CT2)	Acero Inoxidable	0,25	0,635	0,166	0,422	3
Coiled Tubing 3 (CT3)	Acero Inoxidable	0,25	0,635	0,166	0,422	2,4

Las características constructivas del equipo, tanto del tramo recto como de las espirales de coiled tubing se extrajeron del Paper de referencia que abordó estudios experimentales similares (Shah, Kamel, & Zhou, 2006). Sin embargo, en el presente ensayo se utiliza un valor nominal de diámetro externo de tubería distinto (1/4"), y los valores de longitud de las espirales también difieren. Esta variación se debe a que no se contaba con las herramientas necesarias para dar la curvatura deseada en el laboratorio,

por lo cual, se ajustó la tubería a configuraciones disponibles que permitieran moldear la curvatura.

Esta curvatura es importante, ya que el comportamiento del flujo en tuberías curvas es diferente al de tuberías rectas debido a la aparición de la fuerza centrífuga que induce flujos secundarios transversales a la pared del tubo, resultando en considerables pérdidas de energía. (Shah, Kamel, & Zhou, 2006).

Para evaluar el impacto de la curvatura, se calculará la relación de curvatura (r/R), que se define como la relación entre el radio interno de la tubería (r) y el radio de curvatura (R). Al tratarse de un número adimensional, permite replicar los resultados en situaciones más allá del laboratorio.

$$\text{Relación de curvatura} = \frac{r}{R} \quad [\text{Ec. 17}]$$

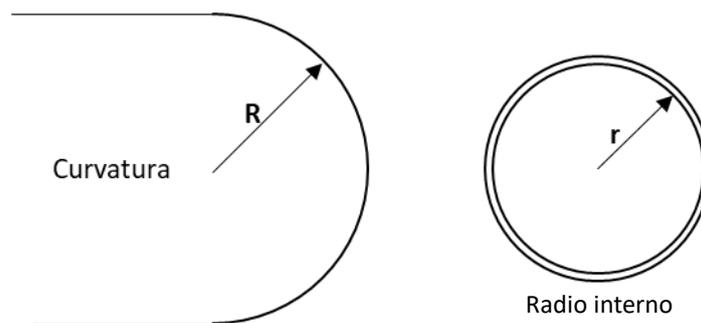


Figura 3.3: relación de curvatura.

Los valores de relación de curvatura calculados para cada una de las espirales del circuito se pueden observar en la tabla 3.2:

Tabla 3.2: valores de relaciones de curvatura.

C.T. relaciones de curvatura					
N.º config.	Long. [m]	R [cm]	r [cm]	N.º vueltas	r/R
Espiral 1 (CT1)	4	21,25	0,211	3	0,010
Espiral 2 (CT2)	3	14,50	0,211	3	0,015
Espiral 3 (CT3)	2,4	8,90	0,211	4	0,024

Otros elementos adicionales necesarios tanto para el montaje del circuito como para la toma de mediciones se incluyen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: lista y cantidad de elementos adicionales.

Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
Bomba	1	Balanza	1
Tubería de retorno	2	Probeta	1
Sensores de presión	5	Mezclador	1
Válvulas	3	Mezclador magnético	1
Codos	1	Embudo	1
Tee	5	Matraz	1
Conectores rectos	7	Metro	1
Tanque	1		

Una vez establecida la cantidad de tramos y material para el montaje del circuito, se llevó a cabo la siguiente serie de pasos:

- Se corta la tubería de acero flexible (diámetro de $\frac{1}{4}$ de pulgada) en cuatro tramos. los valores de longitud se pueden observar en la tabla 3.1.



Figura 3.4: tubería flexible de acero inoxidable.

- El primer tramo con una longitud de 3 metros se deja de manera recta, mientras que con los tres tramos restantes se procede a darles la curvatura para formar las espirales.



Espiral 1 (CT1)

Espiral 2 (CT2)

Espiral 3 (CT3)

Figura 3.5: espirales con las distintas relaciones de curvatura.



Figura 3.6: tramo de tubería recta.

- A continuación, se procede con su ensamble, conectando los tramos en serie. A la entrada y salida de cada uno de ellos se instala un sensor de presión conforme indica el esquema de la figura 3.2.



Figura 3.7: sensores de presión.

- Tras ensamblar el circuito, se procede a llevarlo a su ubicación final en el laboratorio. Esto es importante debido a que la calibración de los sensores se debe realizar en su posición definitiva.



Figura 3.8: ensamble de las espirales de coiled tubing y tramo recto.



Figura 3.9: entrada al circuito en la parte de la tubería recta.

- Tras el ensamble y con el equipo en su ubicación final, se realiza una verificación para asegurarse que no exista ningún tipo de fuga o pérdida de fluido.



Figura 3.10: posición final del equipo.

3.2. Purga del circuito

El proceso de purga se realiza con el propósito de eliminar cualquier burbuja de aire que haya podido quedar atrapada dentro del circuito. Este procedimiento es necesario, ya

que el entrapamiento puede provocar una mala lectura de los sensores, induciendo errores en los cálculos experimentales.

El procedimiento se realizó mediante los siguientes pasos:

- Inicialmente, con la manguera de entrada llena de agua, se hace circular agua hasta que el flujo se estabilice.
- Con el agua circulando por el circuito se procede con la liberación de cada uno de los sensores, retirándolos temporalmente del circuito para purgar los ductos de conexión que poseen.
- La purga del ducto de conexión (figura 3.11) de los sensores se realiza llenando toda esta parte con agua con la ayuda de una jeringa y un tubo delgado para llenar desde el fondo hasta la parte superior del caño conector del sensor, garantizando la ausencia de burbujas de aire en su interior.
- Una vez completado el paso anterior, se procede a conectar los sensores nuevamente al circuito, sin detener la circulación.
- Los sensores se orientan hacia abajo, es decir, la parte del caño conector va a hacia arriba, tal como ilustra la figura 3.11, de tal manera de asegurar que no entre aire nuevamente al circuito.
- Después de verificar que el circuito está libre de aire, se cierra sus válvulas de entrada y salida para proceder con la calibración de los sensores.

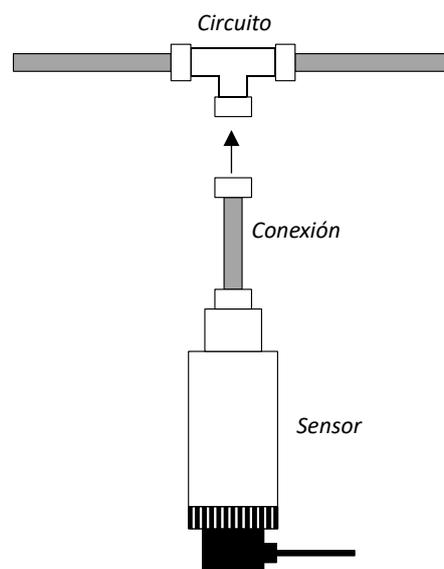


Figura 3.11: conexión de sensores de presión al circuito.

3.3. Calibración de los sensores

Tras un proceso de purga exitoso, se procede con la calibración de los sensores conectando las terminales a *displays* específicos para cada uno de los sensores.



Figura 3.12: cabezal conector al sensor.



Figura 3.14: cables conectores de sensor-display.

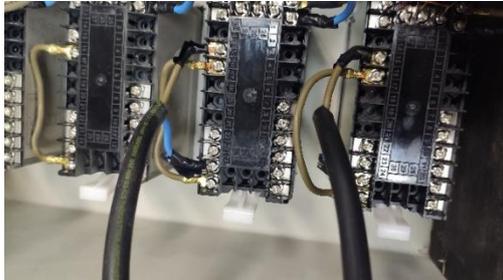


Figura 3.15: conexión parte trasera del display.



Figura 3.13: displays de lectura.

El proceso de calibración se realiza siguiendo las indicaciones del manual del dispositivo, donde se lleva a cabo los siguientes pasos:

- Antes de iniciar la calibración de los sensores, se abre el circuito en su posición final y completamente purgado.
- Se circula agua nuevamente hasta que se estabilice el flujo y se detiene la circulación.
- El extremo de salida del circuito se deja expuesta a presión atmosférica y la parte inicial conectada al tanque de retorno.

- En estado estático se toma la lectura del nivel que servirá como referencia del nivel cero.
- Se establece el estado actual como el punto cero para la calibración de los sensores y se siguen las indicaciones del manual del *display Novus* utilizado para visualizar las lecturas.
- Cada sensor tiene un rango de medición específico conforme indica la tabla 3.4, numerados según su posición en el esquema de la figura 3.2.

Tabla 3.4: rango de cada sensor en el circuito.

Sensor	Rango [bar]
Sensor 1	0 - 20
Sensor 2	0 - 20
Sensor 3	0 - 10
Sensor 4	0 - 10
Sensor 5	0 - 20

- Al momento de la configuración en el *display* se toma como límite inferior el valor mínimo del rango del sensor y como límite superior el valor máximo (los valores se configuran para ser leídos en unidades de psi).
- Se ajusta el *offset* del sensor restando o sumando el valor actual indicado en los *displays* hasta lograr que el valor visualizado sea cero.
- Una vez calibrados, se conectan a una computadora para poder obtener en tiempo real los datos de presión medidos por los sensores.
- Por último, se circula nuevamente agua para verificar la lectura correcta de presión en los sensores.

3.4. Desarrollo experimental

El desarrollo experimental comienza posterior a la correcta calibración de los sensores. Como fase inicial, se analiza la reología de la mezcla agua - polímero para cada una de las concentraciones de los distintos casos indicados en la tabla 3.5. Estos valores de concentración se obtuvieron a través de la revisión bibliográfica y se usan como referencia para el desarrollo de este estudio experimental.

$$\% \text{ concentración} = \left(\frac{\text{masa}_{\text{polímero}}}{\text{masa}_{\text{agua}} + \text{masa}_{\text{polímero}}} \right) \times 100 \quad [\text{Ec. 18}]$$

La solución polimérica a usar es un agregado de poliacrilamida con agua. La poliacrilamida (figura 3.16) es un aditivo ampliamente usado en la industria del petróleo en diversas operaciones (perforación, terminación, etc.).

Tabla 3.5: valores de concentración de las soluciones poliméricas en % de peso en peso para los casos de estudio de reducción en las pérdidas por fricción.

	% Concentración
Caso 1	0,01%
Caso 2	0,05%
Caso 3	0,07%
Caso 4	0,10%
Caso 5	0,15%

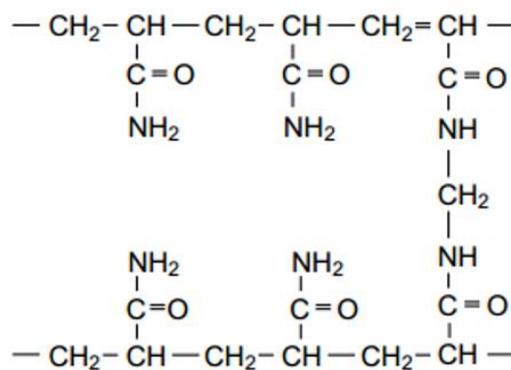


Figura 3.16: estructura química de la Poliacrilamida.

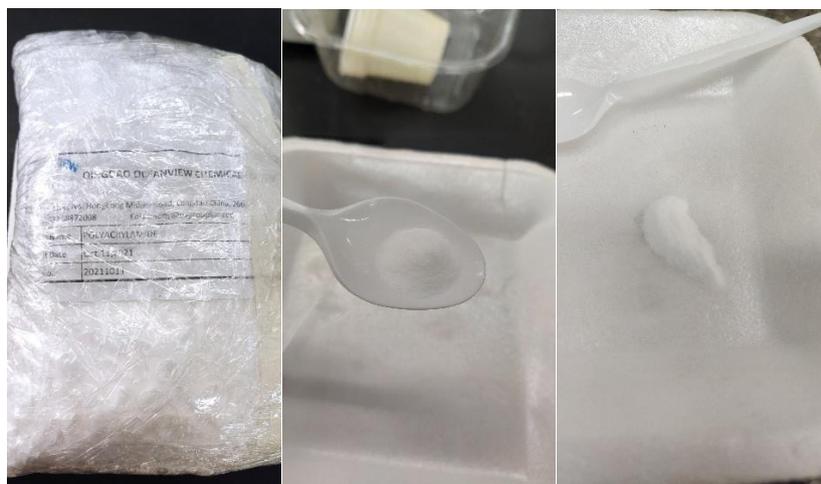


Figura 3.17: poliacrilamida usada en el laboratorio.

El procedimiento que se lleva a cabo en el laboratorio se resume en los siguientes pasos:

1. Realizar una prueba en el circuito con agua para calibrar, medir el caudal y las caídas de presión en tubería recta y espirales.
2. Realizar mediciones para diferentes caudales ajustando la bomba peristáltica.
3. Preparar la mezcla para el valor de concentración del caso 1.
4. Mezclar aproximadamente durante 15 minutos
5. Tomar mediciones de la mezcla en el viscosímetro Fann.
6. Calcular las constantes n y K de la ley de la potencia y los valores de viscosidad aparente.
7. Desplazar el agua del circuito con la solución polimérica.
8. Medir el caudal a la salida del retorno del circuito cuando el flujo esté estabilizado.
9. Medir las caídas de presión. (Los sensores toman registro de presión cada 5 segundos, por lo que se tiene información en todo momento de la circulación de la mezcla dentro del circuito, se debe considerar únicamente los valores de presión cuando el flujo esté estabilizado).
10. Realizar mediciones para diferentes caudales ajustando la bomba peristáltica.
11. Modificar la concentración según el caso siguiente y repetir los pasos del 3 al 10.
12. Por medio de los datos obtenidos de presión se calcula el factor de fricción de Fanning para las distintas concentraciones.
13. Se calcula la variación porcentual del factor de fricción para cada caso.
14. Se grafican los resultados en forma de porcentaje de reducción vs número de Reynolds para los distintos casos.

3.4.1. Cálculo reológico para las distintas concentraciones.

El proceso de cálculo comienza con la preparación de la mezcla. Se toma una muestra de 400 ml de agua, equivalente a la capacidad de la mezcladora (figura 3.20) utilizada para preparar la solución polimérica. Utilizando una balanza de precisión, se mide la cantidad exacta de polímero que se agregará al fluido. Los gramos de polímero a adicionar para obtener las concentraciones de cada uno de los casos se detallan en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: relaciones masa-volumen para las muestras usadas en el estudio reológico de las concentraciones.

	Volumen (agua) [ml]	Masa (polímero) [gr]	% Concentración
Caso 1	400	0,04	0,01%
Caso 2	400	0,20	0,05%
Caso 3	400	0,28	0,07%
Caso 4	400	0,40	0,10%
Caso 5	400	0,60	0,15%



Figura 3.18: volumen de agua.

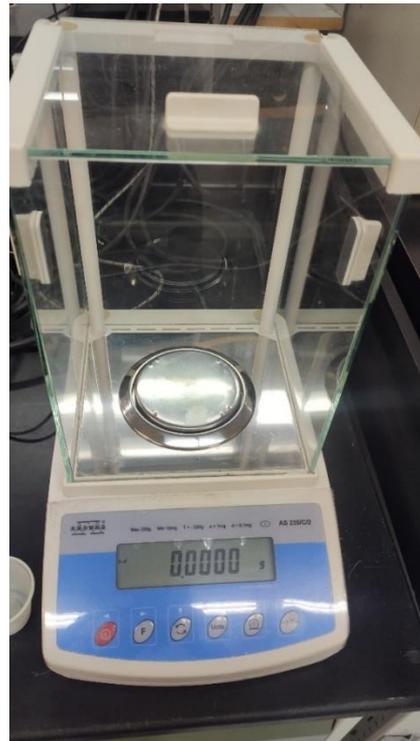


Figura 3.19: balanza de precisión.

Para caracterizar la reología del fluido se utiliza un viscosímetro Fann (figura 3.20), el cual permite tomar mediciones a velocidades de corte definidas en 600, 300, 200, 100, 6, 3 y 0 RPM.



Figura 3.20: equipos usados para la preparación de la mezcla y mediciones reológicas: viscosímetro Fann (izq.), mezcladora Hamilton Beach (der).

Se realizan cuatro tipos de ensayos distintos para poder determinar los valores reológicos en diferentes circunstancias.

- **Primer ensayo:** consiste en un ensayo normal donde se mezcla la solución polimérica durante 15 minutos y se toma las lecturas en el viscosímetro Fann para cada valor de concentración.
- **Segundo ensayo:** se realiza un estudio para analizar el comportamiento de la mezcla para diferentes periodos de agitación durante su preparación. La mezcla de mayor concentración (caso 5) se mantiene en agitación y se toman lecturas en el viscosímetro cada 15 minutos durante un periodo total de 75 minutos.
- **Tercer ensayo:** este estudio se centra en medir la ventana de degradación e hidratación en el tiempo de la solución polimérica. Se toman mediciones una vez preparada la mezcla y se deja en reposo durante un tiempo de 72 hs, para tomar las mediciones nuevamente en el viscosímetro Fann.
- **Cuarto ensayo:** se trata de un estudio sobre el efecto en la reología del tiempo de mezclado, donde la solución polimérica se deja en agitación continua durante 24 horas, para posteriormente tomar lecturas en el viscosímetro Fann.

3.4.1.1. Primer ensayo: Análisis de la reología.

Para la realización de los ensayos se utiliza agua de río, que es comúnmente usada en las operaciones de campo. Se agregan los 400 ml de agua en la mezcladora y, mientras está en agitación, se vierte directamente el polímero sobre el vórtice, usando la cantidad correspondiente previamente medida en la balanza. La agitación se mantiene durante 15 minutos.

La primera mezcla preparada es la de mayor concentración, y el procedimiento se repite de manera similar para las otras soluciones poliméricas.



Figura 3.21: proceso de mezclado agua-polímero: mezcla en preparación(izq.), mezcla preparada (der.).

Terminado el proceso de mezclado, se traslada la muestra al viscosímetro Fann, donde se toman las lecturas a velocidades de rotación de 600, 300, 200, 100, 6, 3 y 0 RPM. Las mediciones se registran una vez el valor que muestra el aparato se estabiliza. Además, el proceso de lectura se realiza dos veces, la primera de forma descendente y a

continuación se toma los datos de forma ascendente, esto para confirmar la consistencia en la lectura en los datos.



Figura 3.22: selector de velocidad (izq.) y lectura del viscosímetro Fann (der.).

Para la solución polimérica con un valor de concentración de 0,15%, los datos obtenidos en el viscosímetro Fann se observan en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: lectura viscosímetro Fann para el caso de una solución polimérica con una concentración de 0,15%.

Concentración 0,15%		
N.º	RPM (ω)	Lectura viscosímetro (θ)
1	600	18
2	300	13
3	200	11
4	100	8
5	6	3
6	3	2
7	0	0

Las lecturas obtenidas del viscosímetro se transforman en valores de esfuerzos de corte (τ) y velocidades de corte (γ), utilizando las constantes que relacionan las características del aparato (relación rotor-balancín-resorte de torsión seleccionado). Recomendadas por el proyecto integrador profesional (PIP) “Ajuste de modelos para la descripción reológica de lodos de perforación base bentonita-agua” (González, 2011).

$$k_1 = 2,84510^{-5}(\text{libras} - \text{pie}/^\circ\text{deflexión})$$

$$k_2 = 375,37(\text{pie}^{-3})$$

$$k_3 = 1,7023(\text{s}^{-1}/\text{RPM})$$

Las fórmulas recomendadas para su uso son:

$$\tau = k_1 k_2 \theta \quad [\text{Ec. 19}]$$

$$\gamma = k_3 \omega \quad [\text{Ec. 20}]$$

donde θ es el valor de lectura en el indicador del viscosímetro y ω el valor de velocidad rotacional (600, 300, 200, 100, 6, 3 y 0 RPM).

Reemplazando los valores de las constantes (k_1 , k_2 y k_3) en las ecuaciones 19 y 20 se obtiene:

$$\tau \left(\frac{\text{lb}}{100\text{pie}^2} \right) = 1,0678\theta \quad [\text{Ec. 21}]$$

$$\gamma(\text{s}^{-1}) = 1,7023\omega \quad [\text{Ec. 22}]$$

Mediante estas ecuaciones y las lecturas tomadas del viscosímetro se calculan los valores de esfuerzos de corte y velocidades de corte. Posteriormente, para los valores de esfuerzos de corte obtenidos de la Ec. 21, se realiza un pasaje a unidades del sistema internacional (SI), expresados en pascales (Pa).

Tabla 3.8: valores de esfuerzo de corte (τ) y velocidad de corte (γ) para una solución polimérica con una concentración de 0,15%.

Concentración 0,15%			
N.º	ω [RPM]	γ [s^{-1}]	τ [Pa]
1	600	1021,38	9,20
2	300	510,69	6,65
3	200	340,46	5,62
4	100	170,23	4,09
5	6	10,21	1,53
6	3	5,11	1,02
7	0	0,00	0,00

Se grafican los resultados obtenidos de esfuerzos de corte (τ) y velocidades de corte (γ) para la solución polimérica (concentración 0,15%).

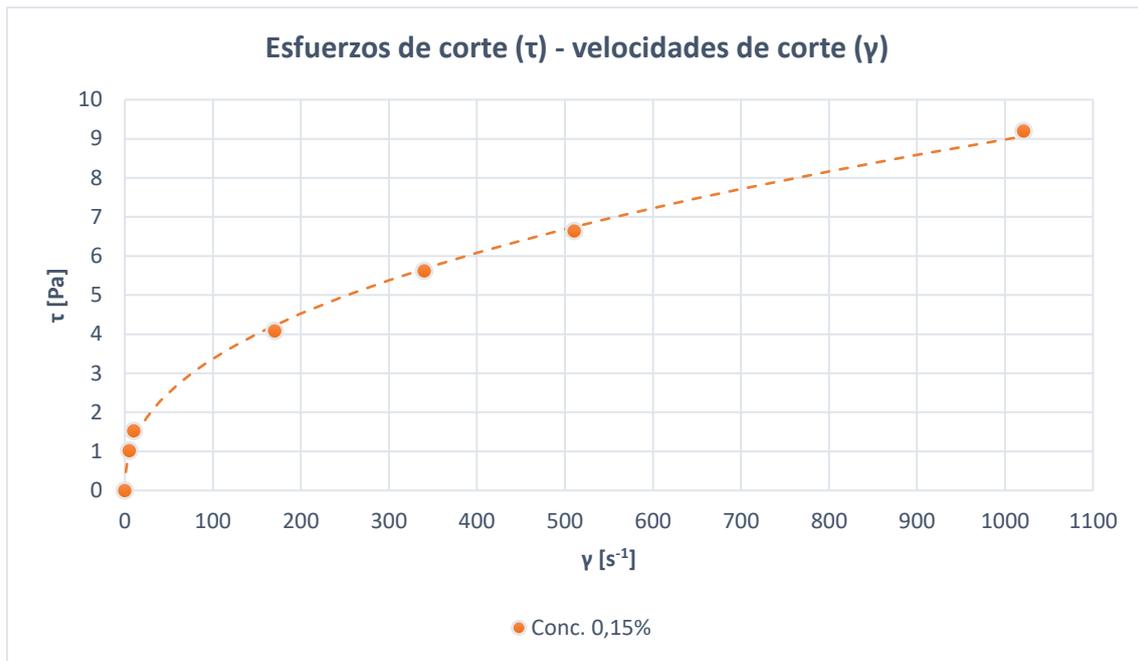


Figura 3.23: gráfico de esfuerzos de corte (τ) en función de las velocidades de corte (γ) para una solución polimérica con una concentración de 0,15%.

En el gráfico de la figura 3.23 se evidencia cómo la relación entre esfuerzos de corte y velocidad de corte tienen un comportamiento no lineal, ajustándose al modelo de la **ley de la potencia** (sección 1.3.4). Esta tendencia es característica de un fluido no newtoniano, ya que modifica su viscosidad aparente (μ_a) conforme varían los esfuerzos de corte.

$$\mu_a = \frac{\tau}{\gamma} \quad [Ec. 23]$$

En el caso de los fluidos no newtonianos que se ajustan al modelo de la ley de la potencia, la viscosidad aparente se puede expresar en función de las constantes k (índice de consistencia) y n (índice de comportamiento) para calcular su valor dependiendo de los distintos valores de velocidad de flujo. El procedimiento detallado de su uso y la fórmula correspondiente (Ec. 26) se presenta más adelante en la sección 3.5.2.

Para los valores calculados mediante la lectura en el viscosímetro Fann (tabla 3.8), los valores de viscosidad aparente para la solución polimérica actual (concentración 0,15%) se presentan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9: valores de viscosidad aparente (μ_a) para una solución polimérica con una concentración de 0,15%.

Concentración 0,15%			
N.º	$\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	τ [Pa]	μ_a [Pa*s]
1	1021,38	9,20	0,0090
2	510,69	6,65	0,0130
3	340,46	5,62	0,0165
4	170,23	4,09	0,0240
5	10,21	1,53	0,1501
6	5,11	1,02	0,2002

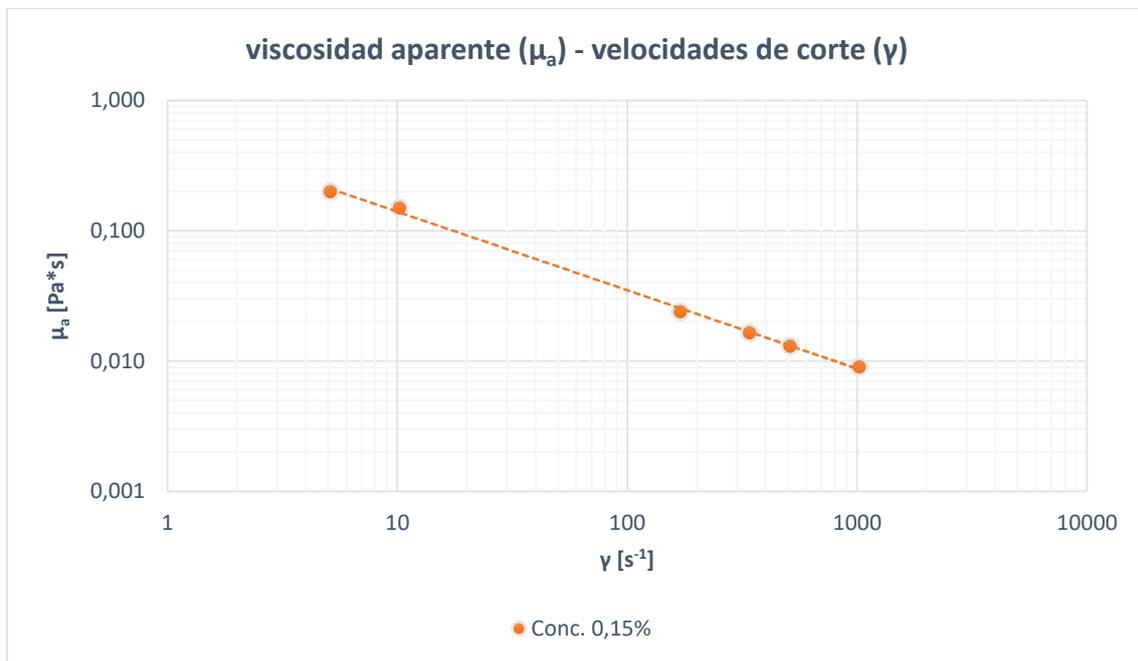


Figura 3.24: gráfico de viscosidad aparente (μ_a) en función de la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) para una solución polimérica con una concentración de 0,15%.

El gráfico de la figura 3.24 muestra como la viscosidad no se mantiene constante ante la variación de la velocidad de corte. Como se mencionó anteriormente, esta característica se corresponde con las de un fluido no newtoniano. Según los resultados obtenidos se puede afirmar que exhibe un comportamiento pseudoplástico respondiendo a la ley de la potencia.

Además, al momento de realizar el proceso de mezclado se manifestó lo que se conoce como **efecto Weissenberg**, donde el fluido comenzaba a ascender por la varilla de las paletas de mezcla, haciendo evidente el carácter no newtoniano del fluido. La aparición de este efecto se debe a que las fuerzas elásticas alcanzan una mayor magnitud que la

de las fuerzas centrífugas, haciendo que el fluido comience a subir, siendo esto característico de fluidos viscoelásticos. (mexpolimeros, s.f.).



Figura 3.25: vórtice al momento de agregar el polímero.

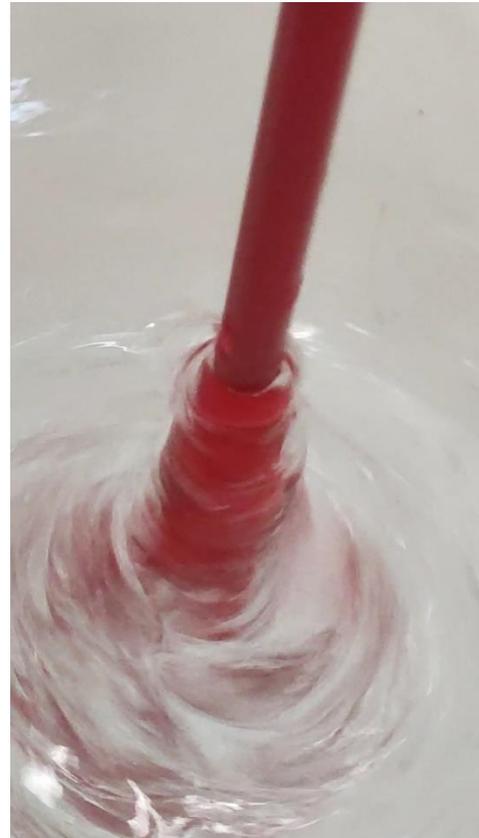


Figura 3.26: vórtice 1 minuto, efecto Weissenberg.

El proceso de análisis realizado para la solución polimérica de concentración 0,15%, se repite para las mezclas de concentraciones restantes (tabla 3.5). Los resultados obtenidos para estas soluciones se pueden apreciar en la tabla 3.10.

Tabla 3.10: lecturas en el viscosímetro Fann para las soluciones poliméricas con concentraciones 0,01%, 0,05%, 0,07% y 0,10%.

N.º	RPM (ω)	Lectura viscosímetro (θ)			
		Conc. 0,10%	Conc. 0,07%	Conc. 0,05%	Conc. 0,01%
1	600	12	9	7	3
2	300	9	6	4	2
3	200	7	5	3	1
4	100	5	3	2	1
5	6	2	1	0,5	-
6	3	1	0,5	-	-
7	0	0	0	-	-

Los valores de las mediciones N.º6 y N.º7 de la concentración 0,05% y las N.º5, N.º6 y N.º7 de la concentración 0,01% en la tabla 3.10, se eliminaron debido a que el indicador del viscosímetro Fann no lograba su estabilización, lo que no permitió la correcta lectura en el aparato.

Continuando con el procedimiento, se realizan los cálculos de esfuerzos de corte y velocidad de corte.

Tabla 3.11: valores de esfuerzos de corte (τ) y velocidades de corte (γ) para las soluciones poliméricas con concentraciones 0,01%, 0,05%, 0,07% y 0,10%.

N.º	γ [s^{-1}]	τ [Pa]			
		Conc. 0,10%	Conc. 0,07%	Conc. 0,05%	Conc. 0,01%
1	1021,38	6,13	4,60	3,58	2,04
2	510,69	4,60	3,07	2,04	1,02
3	340,46	3,58	2,56	1,53	0,77
4	170,23	2,56	1,53	1,02	0,51
5	10,21	1,02	0,51	0,26	-
6	5,11	0,51	0,26	-	-
7	0,00	0,00	0,00	-	-

El gráfico con los resultados se puede observar en la figura 3.27.

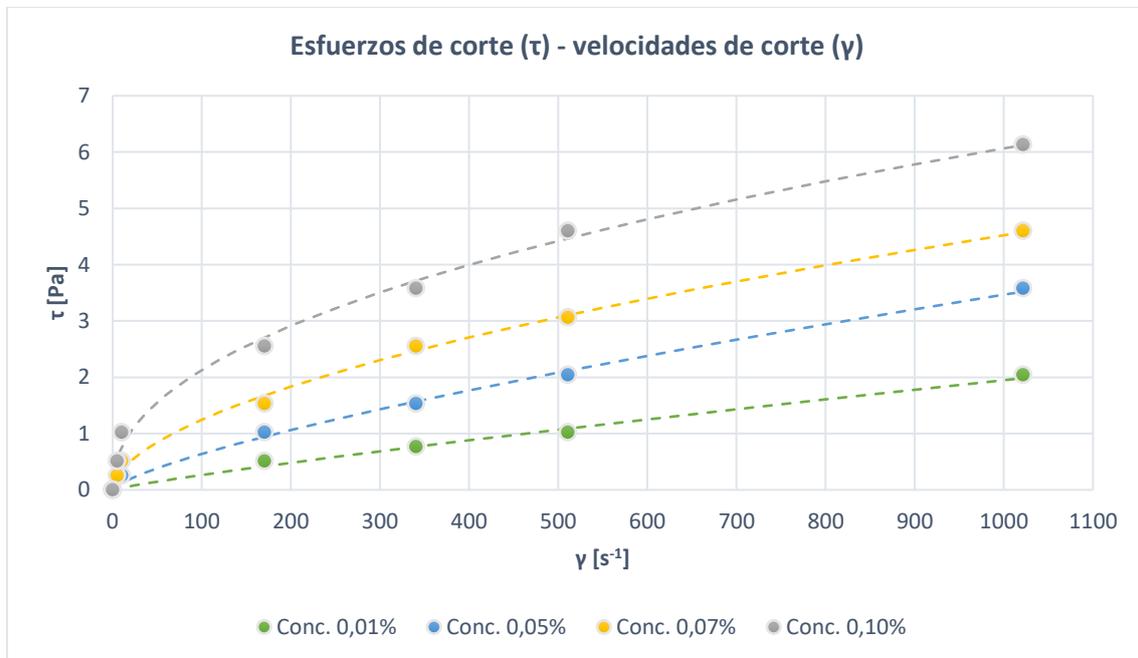


Figura 3.27: gráfico de esfuerzos de corte (τ) en función de las velocidades de corte (γ) para las soluciones poliméricas de concentraciones 0,01%, 0,05%, 0,07% y 0,10%.

Para el cálculo de las viscosidades aparentes, se procede de manera similar que para la solución polimérica de concentración 0,15%.

Tabla 3.12: valores de viscosidad aparente (μ_a) para las soluciones poliméricas de concentraciones 0,01%, 0,05% 0,07% y 0,10%.

N.º	γ [s^{-1}]	μ_a [Pa s]			
		Conc. 0,10%	Conc. 0,07%	Conc. 0,05%	Conc. 0,01%
1	1021,38	0,0060	0,0045	0,0035	0,0020
2	510,69	0,0090	0,0060	0,0040	0,0020
3	340,46	0,0105	0,0075	0,0045	0,0023
4	170,23	0,0150	0,0090	0,0060	0,0030
5	10,21	0,1001	0,0500	0,0250	-
6	5,11	0,1001	0,0500	-	-

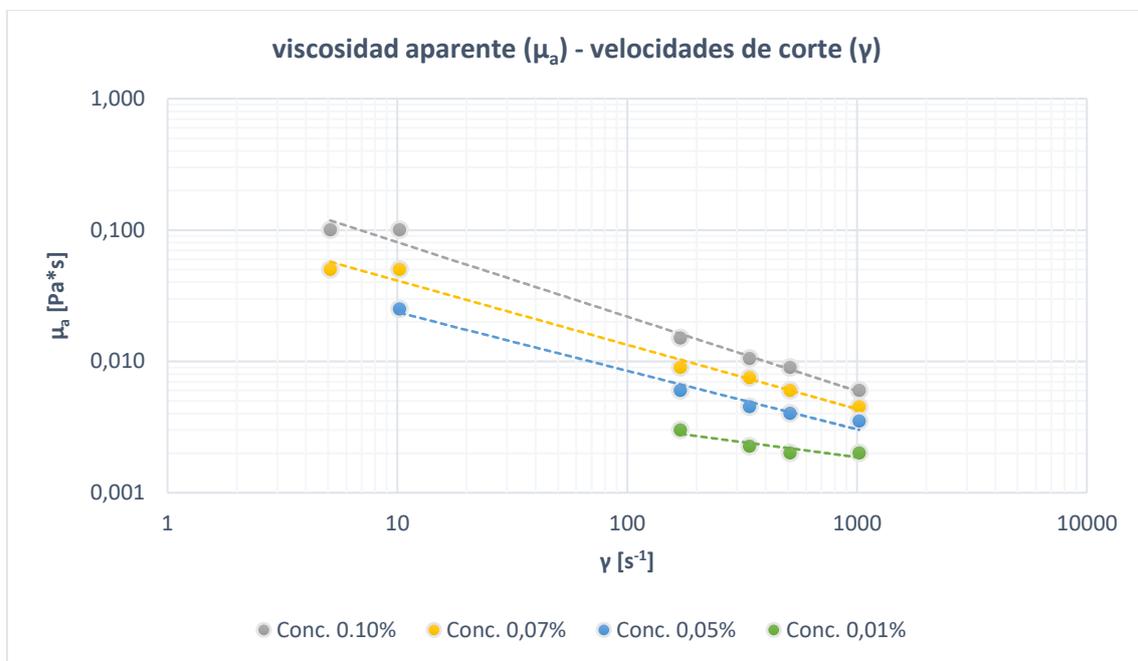


Figura 3.28: gráfico de viscosidad aparente (μ_a) en función de la velocidad de corte (γ) para las soluciones poliméricas de concentraciones 0,01%, 0,05%, 0,07% y 0,15%.

Como se observa en los gráficos de las figuras 3.24 y 3.28, las soluciones poliméricas presentan una viscosidad aparente variable, es decir, no se mantiene constante con los esfuerzos, esto valida el comportamiento no newtoniano de las soluciones y su clasificación como pseudoplásticas, respondiendo a la ley de la potencia.

Es evidente que, a medida que disminuye la concentración (figura 3.28), la pendiente de la línea de tendencia es menor, esto se debe a la transición a una solución más acuosa, perdiendo progresivamente el carácter no newtoniano.

Por otro lado, para caracterizar las soluciones poliméricas mediante las constantes n (índice de comportamiento) y K (índice de consistencia) de la ley de la potencia (Ec. 7), los datos de esfuerzos de corte (τ) y velocidades de corte ($\dot{\gamma}$) se transfirieron a un *software* especializado para realizar regresiones no lineales “*Curve Expert*” propiedad de *Hyams Development*, y así obtener valores más precisos de dichas constantes.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad [Ec. 7]$$

Los datos obtenidos de los valores de las constantes se muestran en la tabla 3.13.

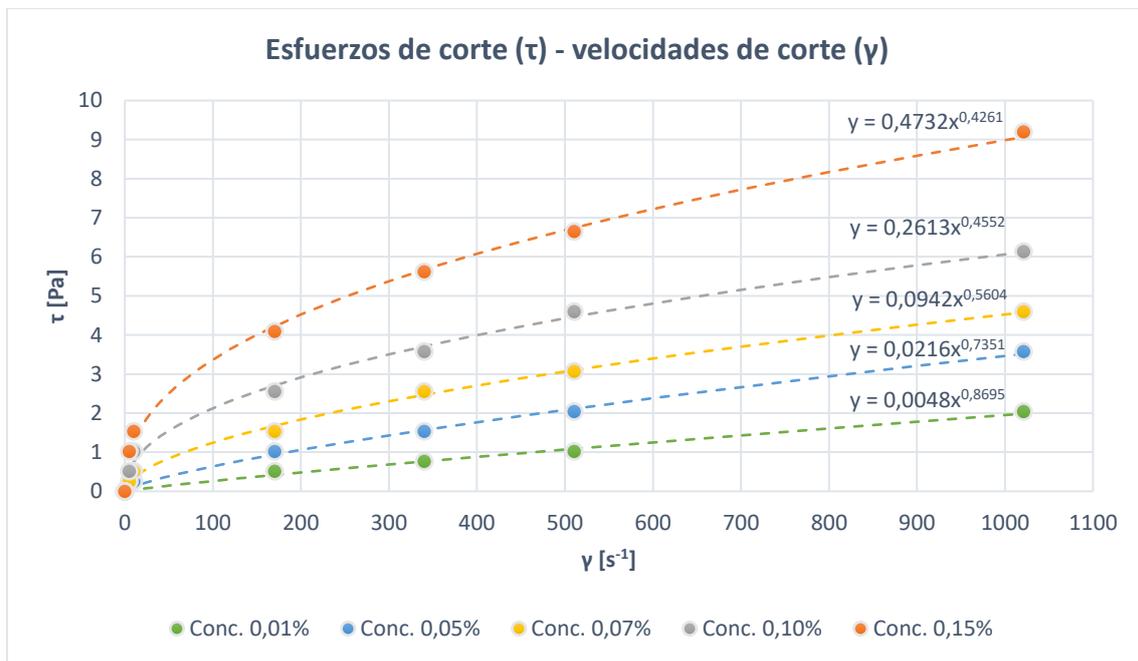


Figura 3.29: gráfico de esfuerzos de corte (τ) y velocidades de corte ($\dot{\gamma}$) para las soluciones poliméricas.

Tabla 3.13: valores del índice de consistencia (K) e índice de comportamiento (n) de la ley de la potencia para las soluciones poliméricas.

Concentración	n	k [Pa s ^{n}]
0,01%	≈0,8695	≈0,0048
0,05%	≈0,7351	≈0,0216
0,07%	0,5604	0,0942
0,10%	0,4552	0,2613
0,15%	0,4261	0,4732

Los valores de las constantes para los casos de concentraciones 0,01% y 0,05% se consideran estimaciones aproximadas, debido a la limitación que surgió en la lectura del viscosímetro a bajas velocidades para estas soluciones, ya que no se estabiliza su valor por lo cual la lectura no pudo llevarse con precisión. La oscilación constante llevó a tomar

la decisión de descartar estas lecturas, por lo que se desconoce cuál es el comportamiento real de estos fluidos ante esfuerzos reducidos.

3.4.1.2. Segundo ensayo: intervalos de tiempos en agitación.

Este ensayo se enfoca en analizar el comportamiento de la solución polimérica después de periodos prolongados de mezcla, con el fin de determinar si se ven afectadas sus propiedades reológicas.

Para ello, se toman datos de la reología en el viscosímetro en intervalos definidos cada 15 minutos durante un periodo total de 75 minutos. La concentración utilizada en este ensayo es de 0,15%, ya que al tener mayores valores de viscosidad aparente facilita el análisis y las lecturas sobre el viscosímetro Fann.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.14.

Tabla 3.14: lecturas en el viscosímetro Fann para el ensayo de intervalos de tiempo cada 15 minutos con una solución polimérica de concentración 0,15%.

Concentración 0,15%						
N.º	RPM (ω)	Lectura viscosímetro (θ)				
		15 min.	30 min.	45 min.	60 min.	75 min.
1	600	18	18	18,5	19	19
2	300	13	13	13,5	14	14
3	200	11	11	11	11	11
4	100	8	8	8	8	8
5	6	3	2,5	2	2	1,5
6	3	2	2	1,5	1	1
7	0	0	0	0	0	0

De manera similar a lo realizado en el ensayo anterior (sección 3.4.1.1), se calculan los esfuerzos de corte (τ), velocidades de corte (γ) y viscosidades aparentes (μ_a) para los intervalos de tiempo.

Tabla 3.15: valores de esfuerzo de corte (τ) y velocidad de corte (γ) para el ensayo de intervalos de tiempo cada 15 minutos con una solución polimérica de concentración 0,15%.

Concentración 0,15%						
N.º	γ [s^{-1}]	τ [Pa]				
		15 min	30 min	45 min	60 min	75 min
1	1021,38	9,20	9,20	9,46	9,71	9,71
2	510,69	6,65	6,65	6,90	7,16	7,16
3	340,46	5,62	5,62	5,62	5,62	5,62
4	170,23	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09
5	10,21	1,53	1,28	1,02	1,02	0,77
6	5,11	1,02	1,02	0,77	0,51	0,51
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 3.16: valores viscosidad aparente (μ_a) y velocidad de corte (γ) para el ensayo de intervalos de tiempo cada 15 minutos con una solución polimérica de concentración 0,15%.

Concentración 0,15%						
N.º	γ [s^{-1}]	μ_a [Pa s]				
		15 min	30 min	45 min	60 min	75 min
1	1021,38	0,0090	0,0090	0,0093	0,0095	0,0095
2	510,69	0,0130	0,0130	0,0135	0,0140	0,0140
3	340,46	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165
4	170,23	0,0240	0,0240	0,0240	0,0240	0,0240
5	10,21	0,1501	0,1251	0,1001	0,1001	0,0751
6	5,11	0,2002	0,2002	0,1501	0,1001	0,1001

Las gráficas con los resultados se observan en las figuras 3.30 y 3.31.

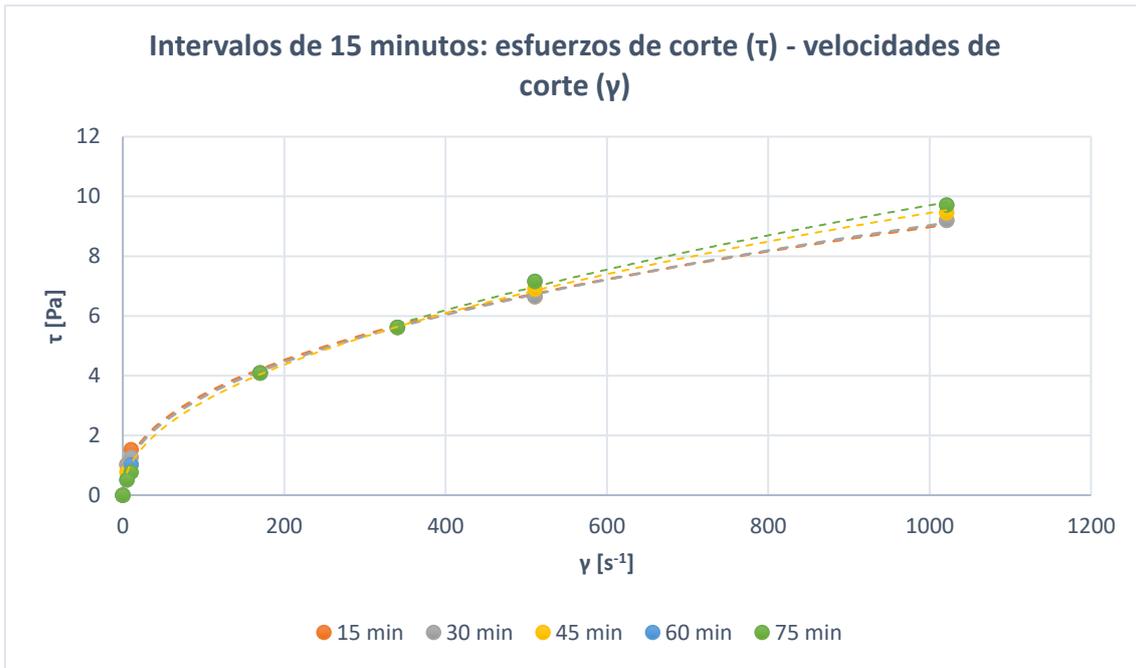


Figura 3.30: gráfico de esfuerzo de corte (τ) vs velocidad de corte (γ) para el ensayo de intervalos de tiempo cada 15 minutos con una solución polimérica de concentración 0,15%.

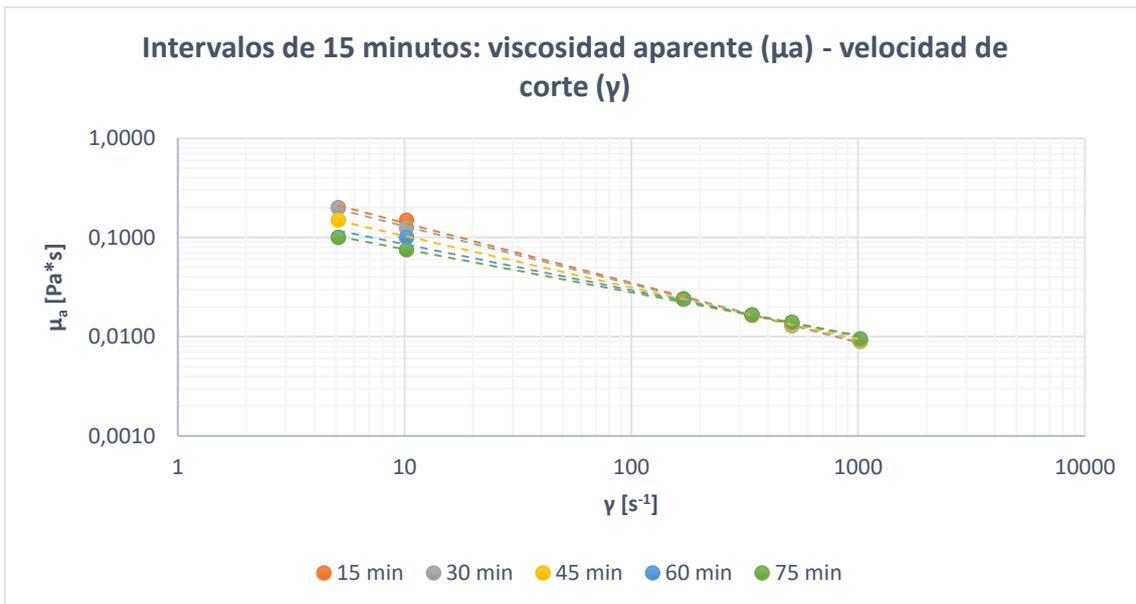


Figura 3.31: gráfico de viscosidad aparente (μ_a) vs velocidad de corte (γ) para el ensayo de intervalos de tiempo cada 15 minutos con una solución polimérica de concentración 0,15%.

La figura 3.31 muestra una disminución gradual de la viscosidad aparente a bajas velocidades en cada periodo de tiempo medido. Sin embargo, a altas velocidades parece recuperar sus propiedades reológicas tendiendo a un único valor.

Esta observación podría deberse a las propiedades viscoelásticas del fluido y un posible fenómeno de histéresis de fuerzas de corte. A altas velocidades de corte, las moléculas

de polímero tienden a alinearse con las líneas de flujo, formando una configuración más extendida. Al momento de detener la agitación, podrían existir fuerzas residuales que mantienen parte de este ajuste estructural producto del proceso de mezclado, lo que resultaría en una medición de viscosidad menor a bajas velocidades. No obstante, estas fuerzas residuales no parecen tener impacto significativo a altas velocidades, donde el fluido recupera sus propiedades reológicas.

Es importante destacar que lo anterior es solamente una interpretación hipotética y podría explicar el comportamiento de los gráficos obtenidos del ensayo. Para confirmar lo mencionado se deberían realizar experimentos específicos para validar este tipo de comportamiento.

3.4.1.3. Tercer Ensayo: Estudio de las propiedades reológicas tras 24 horas en agitación.

En este caso, el objetivo es conocer cómo afecta el tiempo de agitación continuo a las propiedades reológicas de la solución polimérica. Para ello, se mantiene a la mezcla durante 24 horas continuas en un mezclador magnético.

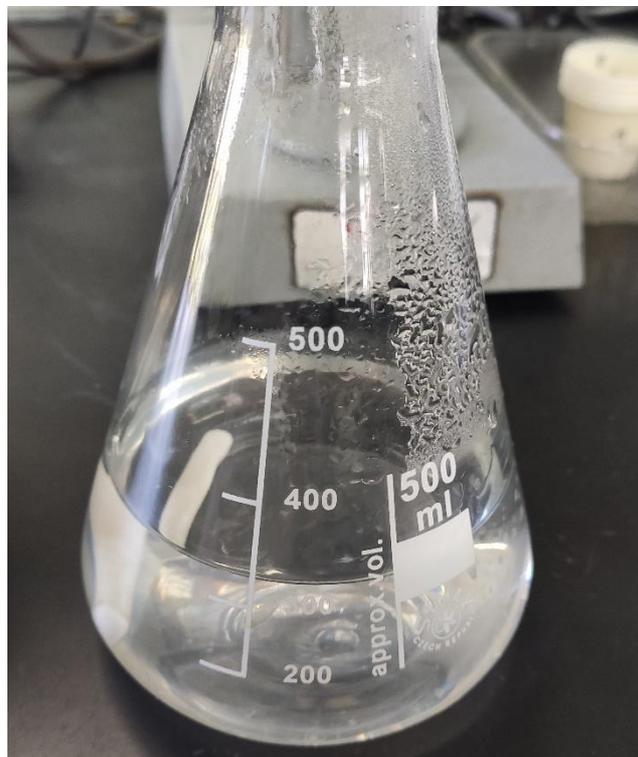


Figura 3.32: muestra de la solución polimérica de concentración 0,15% tras mantenerse en agitación por 24 horas.

Para este ensayo se utilizó una mezcla con un valor de concentración de 0,15% debido a que, al tener mayores valores de viscosidad aparente, facilita la lectura en el viscosímetro.

Los resultados obtenidos de lectura de la mezcla en el viscosímetro tras el periodo de 24 horas en el mezclador magnético, se pueden observar en la tabla 3.17.

Tabla 3.17: lectura sobre el viscosímetro Fann para una solución polimérica de concentración 0,15% durante 24 horas en agitación.

Concentración 0,15% (24 horas en agitación)		
N.º	RPM (ω)	Lectura viscosímetro (θ)
1	600	18
2	300	13
3	200	11
4	100	8
5	6	3
6	3	2
7	0	0

Los valores de esfuerzos de corte (τ), velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) y viscosidad aparente (μ_a) pueden observarse en la tabla 3.18.

Tabla 3.18: valores de esfuerzos de corte (τ), velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) y viscosidad aparente (μ_a) para una solución polimérica de concentración 0,15% en agitación durante 24 horas.

Concentración 0,15% (24 horas en agitación)			
N.º	$\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	τ [Pa]	μ_a [Pa s]
1	1021,38	9,20	0,0090
2	510,69	6,65	0,0130
3	340,46	5,62	0,0165
4	170,23	4,09	0,0240
5	10,21	1,53	0,1501
6	5,11	1,02	0,2002

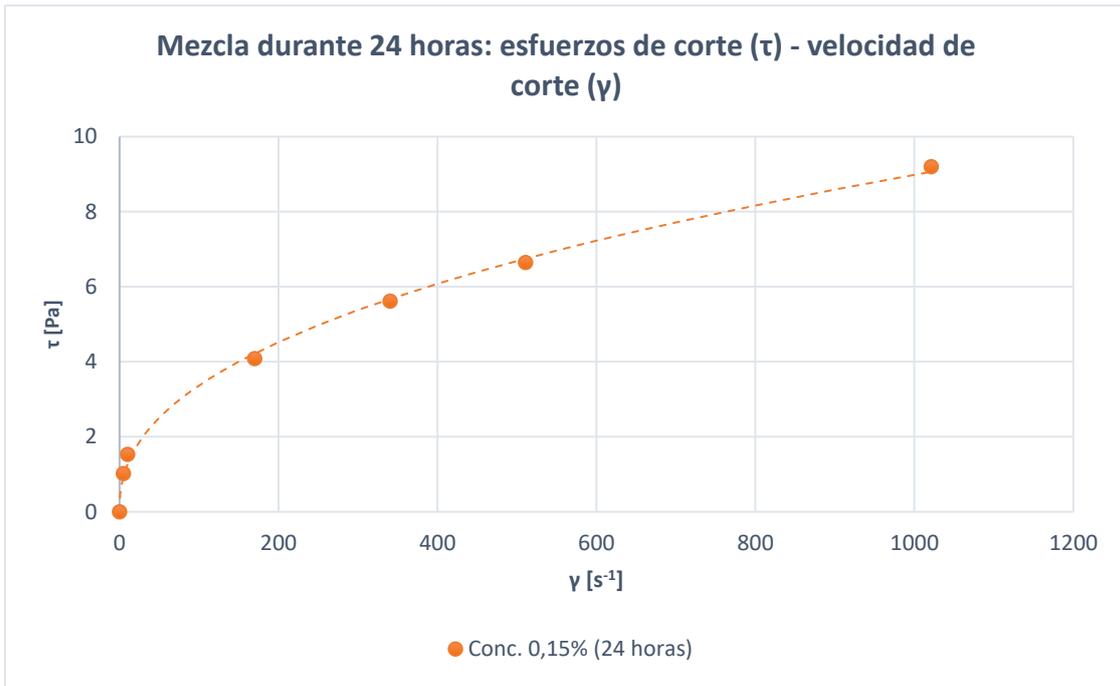


Figura 3.33: valores de esfuerzo de corte (τ) vs velocidad de corte (γ) para una solución polimérica de concentración 0,15% en agitación durante 24 horas.

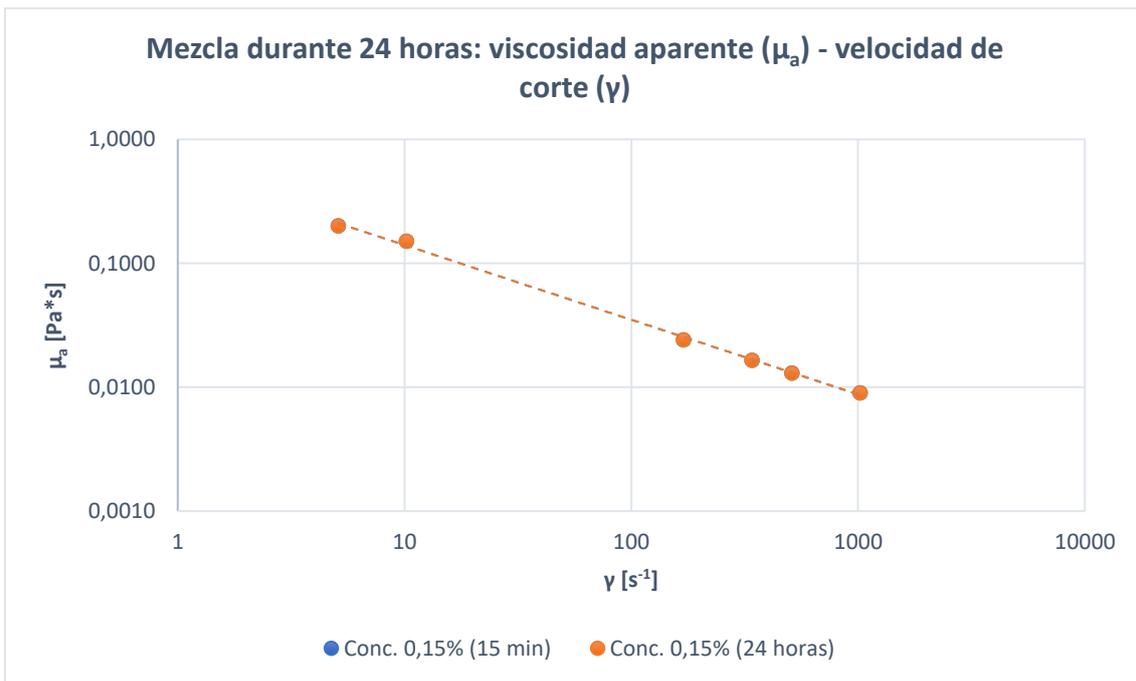


Figura 3.34: gráfico de viscosidad aparente (μ_a) vs velocidad de corte (γ) para una solución polimérica de concentración 0,15% en agitación durante 24 horas.

Después de mantener la solución polimérica en agitación durante 24 horas y tomar los valores de lectura en el viscosímetro Fann, se observa que son iguales a los que se midieron previamente en la muestra a los 15 minutos de mezclado (en el gráfico de la

figura 3.34 se puede observar cómo los valores de viscosidad aparente quedan superpuestos).

Por lo cual, a pesar de estar durante 24 horas en agitación, la solución polimérica conserva sus propiedades reológicas.

3.4.1.4. Cuarto ensayo: hidratación y degradación por tiempo.

Por último, se realiza un ensayo para medir cómo afecta el tiempo en reposo a la mezcla. Para ello, se toma una muestra de la solución polimérica con una concentración de 0,15% y se deja en reposo durante 72 horas. Inicialmente, se realiza el proceso conocido de mezcla y agitación durante 15 minutos, se toman las medidas en el viscosímetro y se deja en reposo. Pasadas las 72 horas se vuelve a medir en el viscosímetro Fann.

Los resultados obtenidos en este ensayo a los 15 minutos y transcurridas las 72 horas en reposo se muestran en las tablas 3.19 (lectura viscosímetro) y 3.20 (valores de esfuerzos y viscosidades aparentes), y en las figuras 3.35 y 3.36.

Tabla 3.19: lectura viscosímetro Fann para una solución polimérica con una concentración de 0,15% después de 72 horas en reposo.

Concentración 0,15%			
N.º	RPM (ω)	Lectura viscosímetro (θ)	
		15 min.	72 horas (en reposo)
1	600	18	22
2	300	13	16
3	200	11	13,5
4	100	8	9,5
5	6	3	2,5
6	3	2	1,5

Tabla 3.20: valores de esfuerzo de corte (τ), velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) y viscosidad aparente (μ_a) para una solución polimérica después de 72 horas en reposo.

Concentración 0,15%					
N.º	$\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	15 min.		72 horas	
		τ [Pa]	μ_a [Pa s]	τ [Pa]	μ_a [Pa s]
1	1021,38	9,20	0,0090	11,25	0,0110
2	510,69	6,65	0,0130	8,18	0,0160
3	340,46	5,62	0,0165	6,90	0,0203
4	170,23	4,09	0,0240	4,86	0,0285
5	10,21	1,53	0,1501	1,28	0,1251
6	5,11	1,02	0,2002	0,77	0,1501

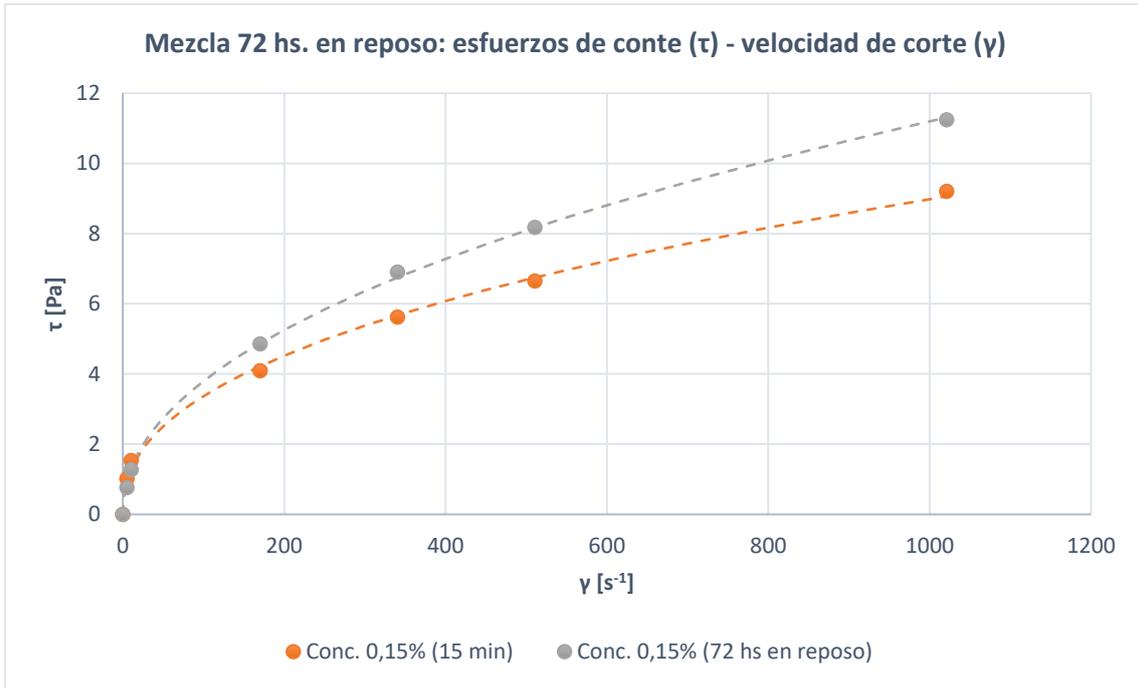


Figura 3.35: gráfico de esfuerzos de corte(τ) vs velocidad de corte (γ) para una solución polimérica de concentración 0,15% después de 72 horas en reposo.

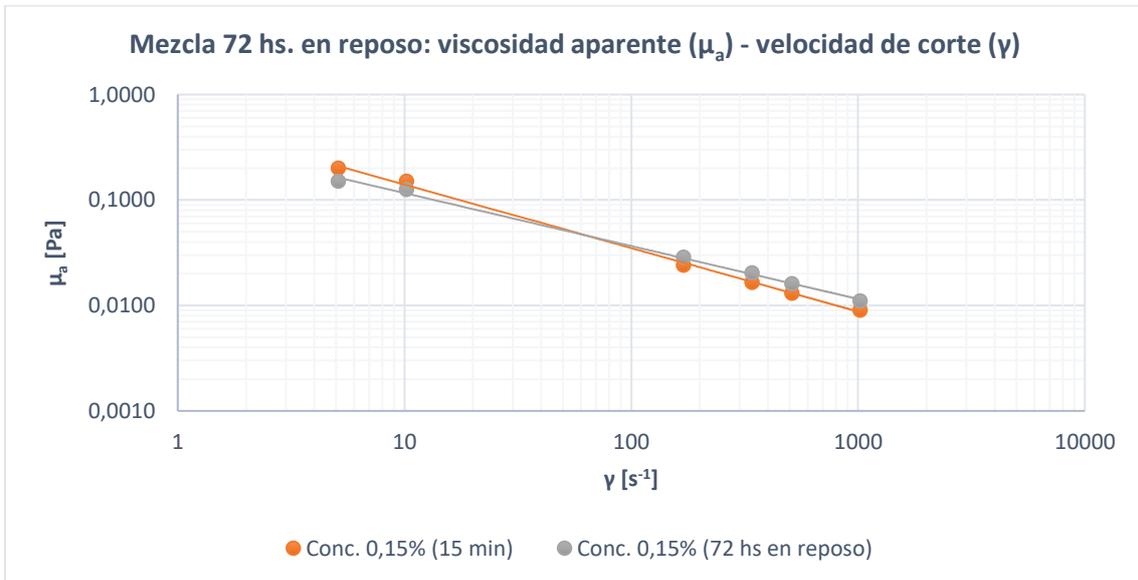


Figura 3.36: gráfico de viscosidad aparente (μ_a) vs velocidad de corte (γ) para una solución polimérica de concentración 0,15% después de 72 horas en reposo.

Los resultados indican un comportamiento similar al caso del segundo ensayo, evidenciando las propiedades viscoelásticas del fluido. También se puede ver en este caso que para bajas velocidades se tiene una disminución en los valores de la viscosidad aparente en el caso de la solución que ha permanecido 72 horas en reposo respecto de

la inicial, mientras que para mayores valores de velocidad de corte la viscosidad aparente es ligeramente mayor.

En este caso la variación podría deberse a la hidratación de la mezcla. Al estar ésta en reposo, es posible que las moléculas hayan absorbido mayor cantidad de agua, experimentando cambios en su comportamiento y estructura, derivándose en un aumento de la viscosidad debido a que la interacción de las moléculas de polímero y las de agua podrían afectar la formación de estructuras que contribuyen a la viscosidad.

Es fundamental aclarar que estas hipótesis ofrecen posibles explicaciones del comportamiento que se muestra en el gráfico de la figura 3.36. Pero al igual que en el segundo ensayo, los experimentos para corroborar los comportamientos están fuera del alcance de este proyecto integrador.

3.5. Ensayo de circulación de fluidos para medir las pérdidas por fricción.

El circuito fue construido con el objetivo de permitir la medición de las caídas de presión para la circulación de las soluciones poliméricas por su interior. Como muestra el esquema de la figura 3.2 visto en la sección 3.1, el circuito se compone de cuatro tramos (uno recto y tres espirales), una manguera de retorno conectada a un tanque y una bomba peristáltica conectada al inicio del circuito.

El proceso se lleva a cabo con una circulación inicial de agua para obtener valores de referencia de las caídas de presión, ya que es el fluido base de las soluciones poliméricas. Después de realizar el proceso de purgado y calibración del circuito, como se indicó en la sección 3.2. Se acciona la bomba en un valor de caudal bajo para observar la respuesta de los sensores y el circuito al momento de la circulación del agua.

Dada la respuesta positiva en las mediciones y el hecho de no encontrar pérdidas de fluido en las conexiones y tramos del circuito, se procede a continuar con el ensayo, variando los valores de caudal mediante la bomba peristáltica.

Cuando se comenzó con las mediciones se detectó que el caudal marcado en el *display* de la bomba no concordaba con el caudal real en circulación, por lo cual se decidió tomar mediciones a la salida del retorno para obtener el valor real de caudal que se encuentra circulando.

La bomba peristáltica es una bomba de desplazamiento positivo que actúa comprimiendo la manguera y encerrando un volumen de fluido para que sea desplazado al momento de girar los rodillos de la bomba.

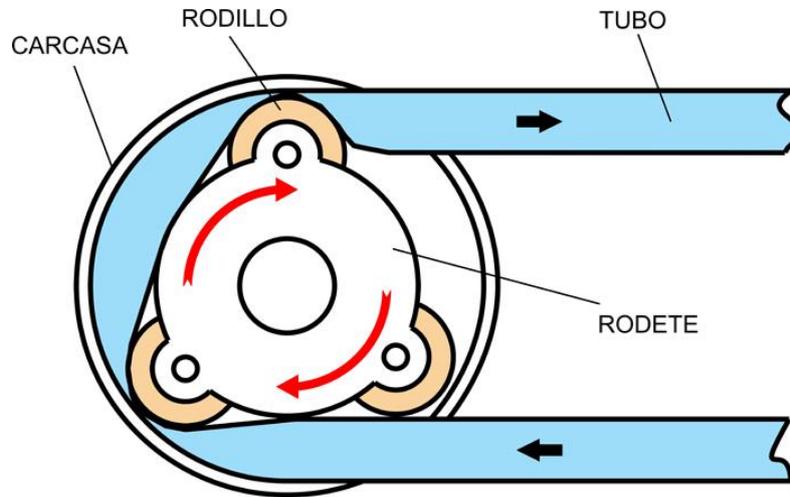


Figura 3.37: esquema del interior de una bomba peristáltica. (Tecnoproducts, 2023).

El funcionamiento ideal depende de un ajuste perfecto entre el rodillo y la carcasa, sin embargo, en condiciones reales este ajuste perfecto no se logra, lo que provoca un deslizamiento del fluido y hace que el caudal que circula no sea el mismo que marca la bomba, sino que sea menor (aproximadamente la mitad del caudal indicado cuando se realizó el ensayo con agua). De hecho, este efecto es más evidente al momento que circulan las soluciones poliméricas, ya que con el aumento de la viscosidad aparente el caudal cae drásticamente.

Por lo tanto, define medir el caudal real a la salida del retorno del circuito cada vez que se aumente la velocidad de rotación de la bomba, y una vez que el sistema se encuentre estabilizado.

3.5.1. Circulación con agua

Como se mencionó anteriormente, el primer ensayo consistió en la circulación de agua a distintos valores de caudal. Durante el mismo se logró obtener caudales desde 0,52 l/min hasta un máximo de 2,11 l/min. Mientras se circulaba, los sensores registraban los valores de presión en el circuito conforme variaban los caudales, las mediciones obtenidas se observan en el gráfico de la figura 3.38. Debe tenerse en cuenta que el dato

de presión que se toma como válido es el que se registra una vez el flujo se encuentra estabilizado.

Siguiendo el procedimiento detallado en la sección 3.4 se pudo registrar el comportamiento de la presión en el tiempo para cada uno de los sensores. Con el uso del *software* del laboratorio se obtuvo el gráfico de la figura 3.38. El programa registra un dato de presión cada 5 segundos. Como puede observarse, se hace circular un caudal determinado de agua por el circuito por un lapso de tiempo suficiente que permita la estabilización de la presión. Una vez estabilizado, se registra el valor de presión promedio, ya que presenta pequeñas fluctuaciones. Este valor de presión para el caudal mencionado y en un sensor determinado, representa un punto en el gráfico de la figura 3.39. Se repite el mismo procedimiento para todos los sensores. Luego, se aumenta el caudal de circulación y se repiten los pasos.

Cabe mencionar que para el caudal de 3 l/min se podían observar grandes fluctuaciones en los registros de presión, algo que se repetía para el caudal de 6 l/min. Por esta razón se decide obviar dichos resultados.

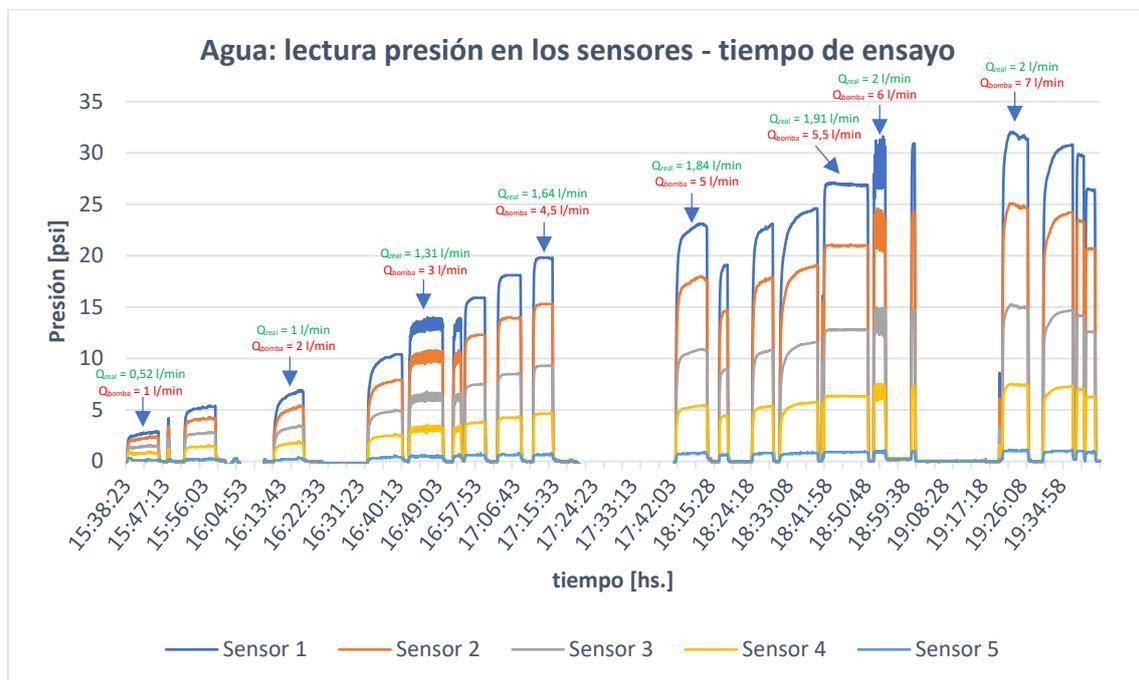


Figura 3.38: medición de la presión para los distintos sensores en el tiempo de ensayo en el laboratorio con agua para caudales ascendentes.

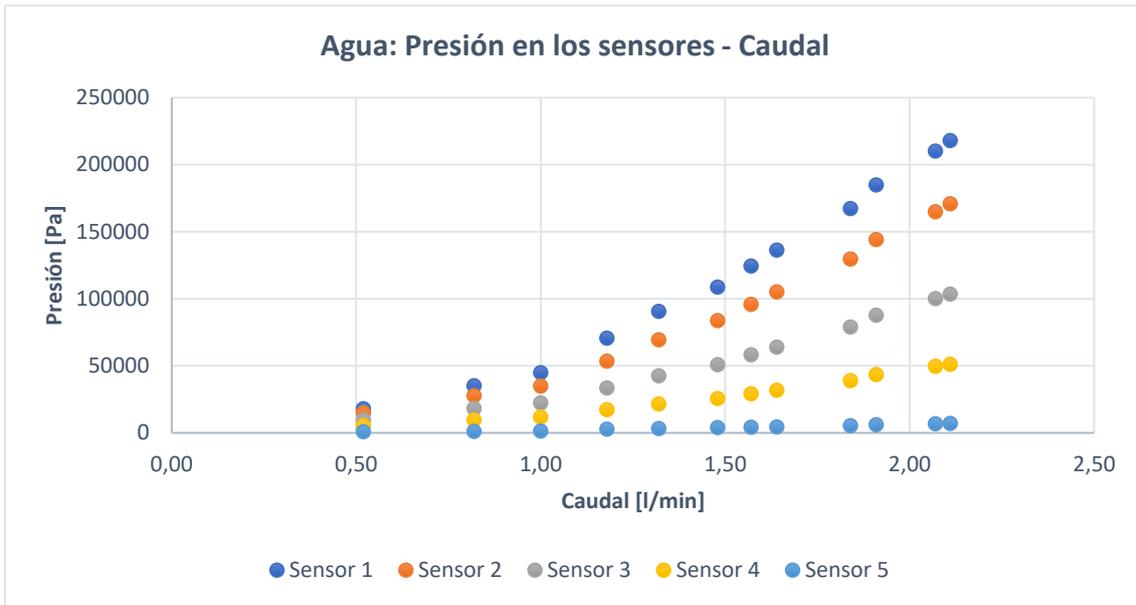


Figura 3.39: medición de la presión en los sensores del circuito para los distintos caudales de circulación con agua.

Graficando las caídas de presión (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para los distintos tramos del circuito (tubería recta y espirales), se puede observar cómo es la evolución de las pérdidas de carga para el agua.

El número de Reynolds se calcula según indica la Ec. 2 vista en la sección 1.2.

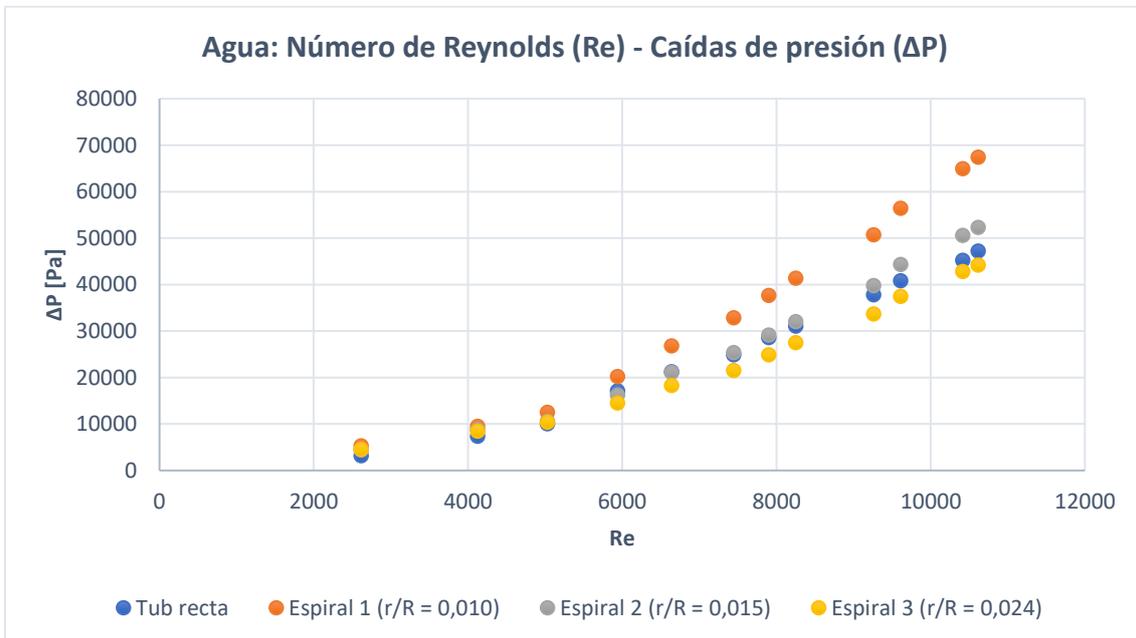


Figura 3.40: caídas de presión para los tramos del circuito en función del número de Reynolds para la circulación con agua.

Para confirmar como afecta realmente la relación de curvatura a las pérdidas por fricción se analizará los resultados cuando se calcule otra variable adimensional, que es el factor de fricción de Fanning, el cual se definió en la sección 1.6.

Con el objetivo de obtener una expresión para su cálculo, se parte de la *Ec. 12* vista en sección 1.5.2. A partir de esta ecuación, se despeja el factor de fricción de Darcy para obtenerlo en función de las caídas de presión.

$$h_f = f_{Darcy} \frac{L v^2}{d 2g} \quad [Ec. 12]$$

Se sabe por la ecuación de la energía desarrollada en la sección 1.4.2, que las pérdidas debido a la fricción son equivalentes a:

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} + \Delta z$$

Como no hay variación de la altura entre la entrada y la salida, se puede eliminar este término. Reemplazando en la *Ec. 12* y despejando el factor de fricción, se obtiene:

$$f_{Darcy} = \frac{2d_i \Delta P}{L \rho v^2} \quad [Ec. 24]$$

La *Ec. 24* corresponde a lo que se conoce como **factor de fricción de Darcy (f_D)**, como se mencionó en la sección 1.6, el **factor de fricción de Fanning (ff)** es un cuarto del valor de Darcy y es el de uso común en la industria del petróleo y gas.

$$f_{fanning} = \frac{f_{Darcy}}{4}$$

$$f_{fanning} = \frac{d_i \Delta P}{2L \rho v^2} \quad [Ec. 25]$$

La *Ec. 25* representa el factor de fricción de Fanning (ff), esta ecuación se usará a partir de ahora para su cálculo. Los valores obtenidos en el ensayo con agua de caudales, caídas de presión (ΔP), el cálculo del número de Reynolds (Re) y factor de fricción de Fanning (ff) se presentan en la tabla 3.21.

Tabla 3.21: valores de caudal, velocidad, caídas de presión (ΔP), número de Reynolds (Re) y factor de fricción de Fanning (ff) para la circulación con agua.

Agua										
Caudal [l/min]	Vel. [m/s]	Re	Tubería recta		Espiral 1 (r/R = 0,010)		Espiral 2 (r/R = 0,015)		Espiral 3 (r/R = 0,024)	
			ΔP [Pa]	ff	ΔP [Pa]	ff	ΔP [Pa]	ff	ΔP [Pa]	ff
0,52	0,62	2617	3148	0,005384	5264	0,007201	4364	0,007961	4543	0,010358
0,82	0,98	4127	7324	0,005036	9486	0,005219	8740	0,006411	8428	0,007728
1,00	1,19	5033	10050	0,004647	12477	0,004615	10589	0,005223	10356	0,006385
1,18	1,41	5939	17076	0,005671	20175	0,005360	16211	0,005742	14458	0,006402
1,32	1,58	6643	21234	0,005635	26797	0,005689	21063	0,005962	18268	0,006464
1,48	1,77	7449	24887	0,005254	32859	0,005549	25351	0,005708	21530	0,006060
1,57	1,87	7902	28581	0,005361	37645	0,005650	29148	0,005832	24842	0,006213
1,64	1,96	8254	31026	0,005334	41323	0,005683	32037	0,005875	27444	0,006291
1,84	2,20	9261	37756	0,005157	50701	0,005540	39794	0,005797	33638	0,006126
1,91	2,28	9613	40789	0,005170	56398	0,005719	44308	0,005990	37419	0,006324
2,07	2,47	10418	45232	0,004881	64891	0,005602	50562	0,005820	42768	0,006154
2,11	2,52	10619	47170	0,004899	67397	0,005600	52293	0,005793	44167	0,006116

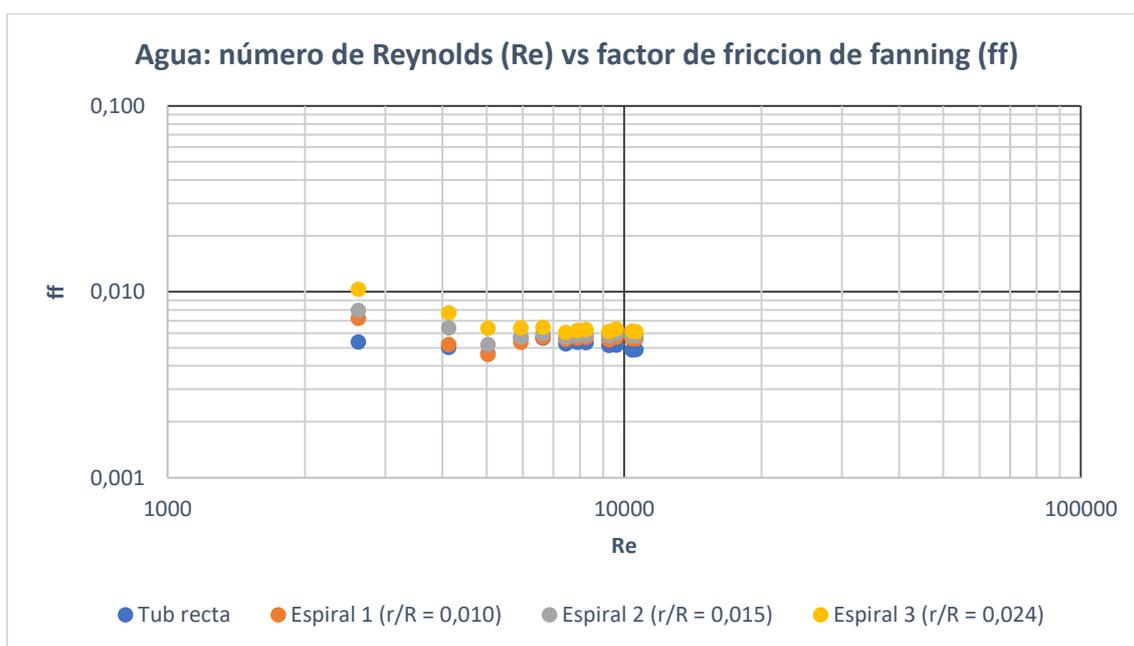


Figura 3.41: gráfico de factor de fricción de Fanning (ff) en función del número de Reynolds (Re) para la circulación con agua.

3.5.2. Circulación con soluciones poliméricas

Para este caso se tomaron los valores de concentración más elevados (0,07%, 0,10% y 0,15%) para las soluciones poliméricas. Se descartaron los casos de concentraciones más bajas (0,01% y 0,05%) para este ensayo, debido a que las constantes n y K características

de los fluidos no newtonianos no tenían gran exactitud para definir el carácter reológico de estas mezclas, debido a que no se tenía información del comportamiento reológico de estas soluciones a bajas velocidades, tal como fue detallado en la sección 3.4.1.

Los valores de n y K son necesarios para la caracterización de los fluidos no newtonianos. Además, mediante el índice de comportamiento (n) se puede obtener el valor de número de Reynolds crítico (Re_c), donde se produce el cambio de flujo laminar a turbulento. Para el cálculo en fluidos no newtonianos y que responden a la ley de la potencia se emplea el criterio de Ryan and Johnson (1959) (Chhabra & Richardson, 1999, pág. 90).

$$Re_c = \frac{6464n}{(3n + 1)^2} (2 + n)^{(2+n)/(1+n)} \quad [Ec. 26]$$

Los valores del índice de consistencia (K) e índice de comportamiento (n) para los distintos casos de las concentraciones de 0,07% a 0,15% que se calcularon en la sección 3.4.1, se pueden observar en la tabla 3.13. Sustituyendo los valores de n en la Ec. 26, se obtiene el valor de número de Reynolds crítico (Re_c) para los tres casos de concentración que se analizan en este capítulo.

Tabla 3.22: valores de números de Reynolds críticos para las soluciones poliméricas de concentraciones 0,07%, 0,10% y 0,15%.

Concentración	n	Re_c
0,07%	0,5609	2357
0,10%	0,4552	2394
0,15%	0,3975	2397

Previamente a empezar la medición se asegura que no quede volumen de agua o de cualquier otra solución dentro del circuito sobre desplazando un volumen de 500 ml, equivalente al volumen del interior del circuito y la línea de retorno.

Una vez asegurado que la solución polimérica se encuentra circulando y estabilizada, se procede con la toma de mediciones.

El procedimiento es el mismo que el realizado con el agua, se acciona la bomba peristáltica y una vez estabilizado el flujo, se procede con la medición de caudal a la salida del retorno. La adquisición de datos de presiones registradas por los sensores es enviada a una computadora para su posterior análisis.

3.5.2.1. Solución polimérica de concentración 0,07%

La primera solución polimérica para la cual se realiza el procedimiento es para una concentración de 0,07%, posteriormente se realizará la circulación para una concentración de 0,10% y finalmente se circulará la solución de concentración de 0,15%.

Los resultados de medición en los sensores de todo el circuito para la circulación de la solución polimérica de concentración de 0,07% se presentan en la figura 3.42.

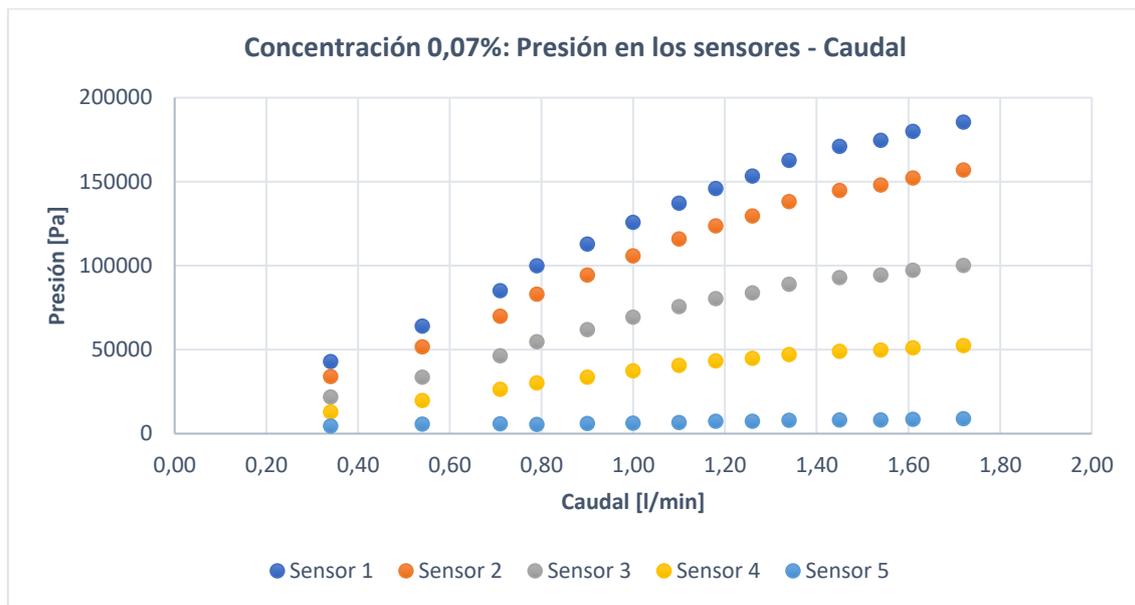


Figura 3.42: medición de la presión en los sensores del circuito para los distintos caudales de flujo con una solución polimérica de concentración 0,07%.

En el caso de los fluidos no newtonianos, al tener una viscosidad variable, no se utiliza directamente la Ec. 2 para calcular el número de Reynolds como se vio en el caso del agua. En este caso se utiliza una expresión para la viscosidad aparente que depende de las constantes n y K (Ec. 27), recomendada por la bibliografía “*Non-Newtonian Flow in the Process Industries*” (Chhabra & Richardson, 1999), y que se reemplaza en la ecuación del número de Reynolds.

$$\mu_{aparente} = K \left(\frac{8v}{d_i} \right)^{n-1} \quad [Ec. 27]$$

Reemplazando la Ec. 27 en la Ec. 2 (ecuación del número de Reynolds) se obtiene la expresión para el cálculo de número de Reynolds para fluidos no newtonianos (Ec. 28) (Chhabra & Richardson, 1999).

$$Re = \frac{1}{8^{n-1}} \frac{\rho}{K} v^{2-n} d_i^n \quad [Ec. 28]$$

Los resultados obtenidos de caudal (Q), viscosidad aparente (μ_a) y número de Reynolds (Re) para la circulación de la solución polimérica de concentración 0,07% se muestran en la tabla 3.23.

Tabla 3.23: valores de caudal (Q), viscosidad aparente (μ_a) y número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,07%.

Concentración 0,07%					
K [Pa sⁿ]	n	Q [l/min]	Vel. [m/s]	μ_a [Pa s]	Re
0,0939	0,5609	0,34	0,41	0,00507	337
		0,54	0,64	0,00414	656
		0,71	0,85	0,00367	973
		0,79	0,94	0,00350	1134
		0,90	1,07	0,00331	1368
		1,00	1,19	0,00316	1592
		1,10	1,31	0,00303	1826
		1,18	1,41	0,00293	2021
		1,26	1,50	0,00285	2221
		1,34	1,60	0,00278	2426
		1,45	1,73	0,00268	2718
		1,54	1,84	0,00261	2964
		1,61	1,92	0,00256	3160
		1,72	2,05	0,00249	3475

Las caídas de presión en función del número de Reynolds se observan en la figura 3.43.

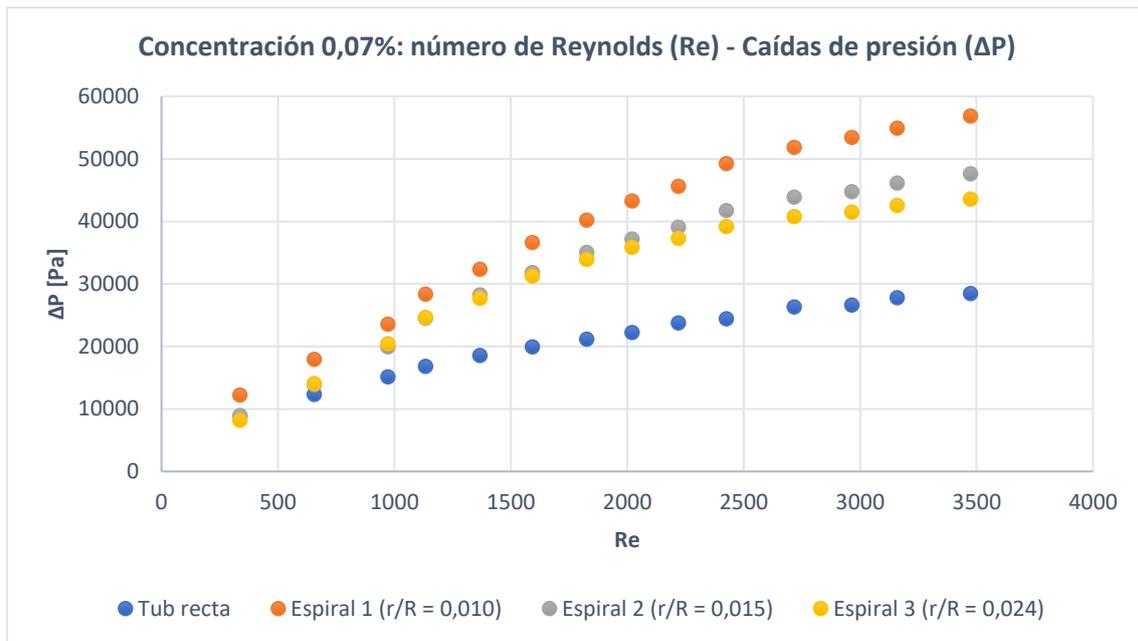


Figura 3.43: caídas de presión (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,07%.

Para el cálculo del factor de fricción de Fanning se debe tener en cuenta el valor de número de Reynolds crítico, debido a que es importante considerar el cambio de flujo laminar a turbulento, ya que de esto depende las fórmulas que se usan para su cálculo.

Para el régimen laminar gobierna la Ec. 14 vista en la sección 1.6, pero con una ligera modificación, ya que el factor de fricción de Fanning (f_f) es una cuarta parte del coeficiente de fricción de Darcy (f_D).

$$f_{fanning} = \frac{16}{Re} \quad [Ec. 29]$$

En régimen laminar el factor de fricción depende solo del número de Reynolds. Sin embargo, para régimen turbulento intervienen otras variables, por lo cual para su cálculo dentro del régimen turbulento se utiliza la Ec. 25.

La tabla 3.22 muestra el valor de número de Reynolds crítico (Re_c) para el cambio de régimen de flujo correspondiente a la solución polimérica de 0,07%.

$$Re_c = 2357$$

En la tabla 3.23, se observa que para esta solución polimérica (concentración 0,07%), a partir del caudal de 1,34 l/min, los valores de número de Reynolds son mayores a los del crítico, por lo cual a partir de este valor de caudal se encuentra el flujo en régimen

turbulento. Los resultados obtenidos de los cálculos del factor de fricción de Fanning (ff) se muestran en la tabla 3.24.

Tabla 3.24: valores de caídas de presión (ΔP), número de Reynolds (Re) y factor de fricción de Fanning (ff) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,07%.

Concentración 0,07%								
Re	Tubería recta		Espiral 1 (r/R = 0,010)		Espiral 2 (r/R = 0,015)		Espiral 3 (r/R = 0,024)	
	ΔP [Pa]	ff	ΔP [Pa]	ff	ΔP [Pa]	ff	ΔP [Pa]	ff
337	8813	0,047463	12255	0,047463	8961	0,047463	8231	0,047463
656	12351	0,024390	17970	0,024390	13945	0,024390	14063	0,024390
973	15168	0,016450	23558	0,016450	19940	0,016450	20479	0,016450
1134	16856	0,014107	28396	0,014107	24569	0,014107	24638	0,014107
1368	18564	0,011694	32355	0,011694	28305	0,011694	27731	0,011694
1592	19930	0,010049	36641	0,010049	31847	0,010049	31291	0,010049
1826	21201	0,008761	40246	0,008761	35088	0,008761	33927	0,008761
2021	22239	0,007919	43283	0,007919	37203	0,007919	35914	0,007919
2221	23769	0,007205	45651	0,007205	39106	0,007205	37299	0,007205
2426	24453	0,006297	49260	0,010148	41778	0,011476	39228	0,013469
2718	26318	0,005788	51891	0,009130	43893	0,010297	40801	0,011964
2964	26640	0,005194	53440	0,008335	44798	0,009317	41511	0,010791
3160	27822	0,004963	54963	0,007844	46181	0,008787	42591	0,010130
3475	28492	0,004453	56866	0,007110	47643	0,007943	43628	0,009092

El gráfico con los valores del factor de fricción de Fanning (ff) en función del número de Reynolds (Re) se observan en la figura 3.44.

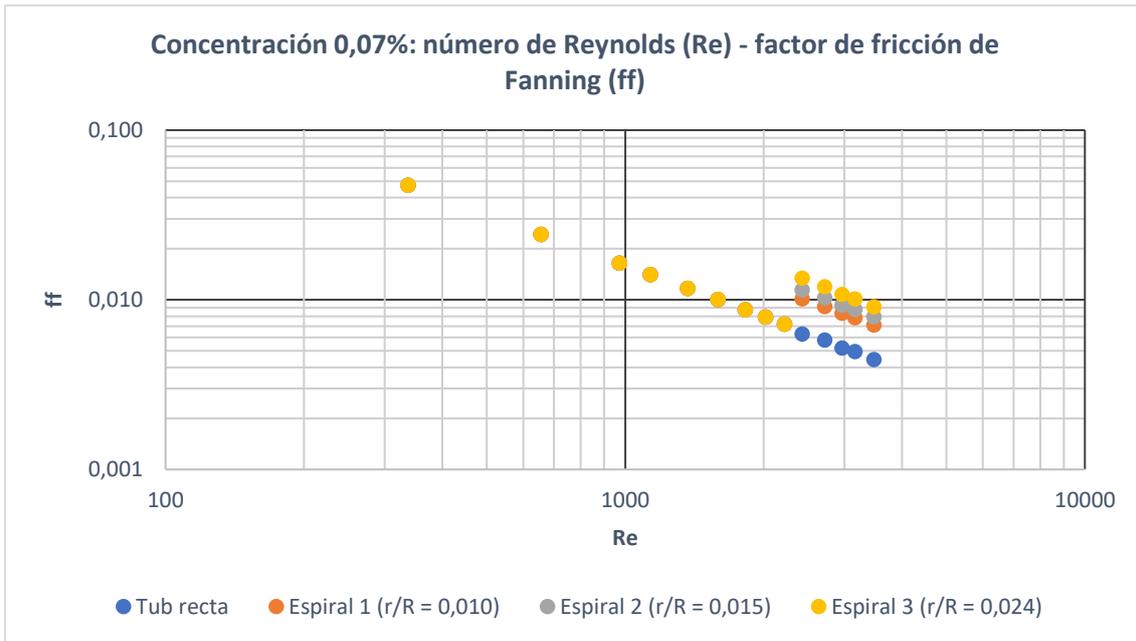


Figura 3.44: factor de fricción de Fanning (ff) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica con una concentración de 0,07%.

3.5.2.2. Solución polimérica de concentración 0,10%

El procedimiento es similar al de la solución polimérica anterior (concentración 0,07%). Previamente, se realizó la circulación y sobre desplazamiento del fluido anterior para obtener el circuito limpio y en condiciones para las mediciones.

Los primeros resultados de valores de presión en los sensores y la variación de caudal se presentan en el gráfico de la figura 3.45.

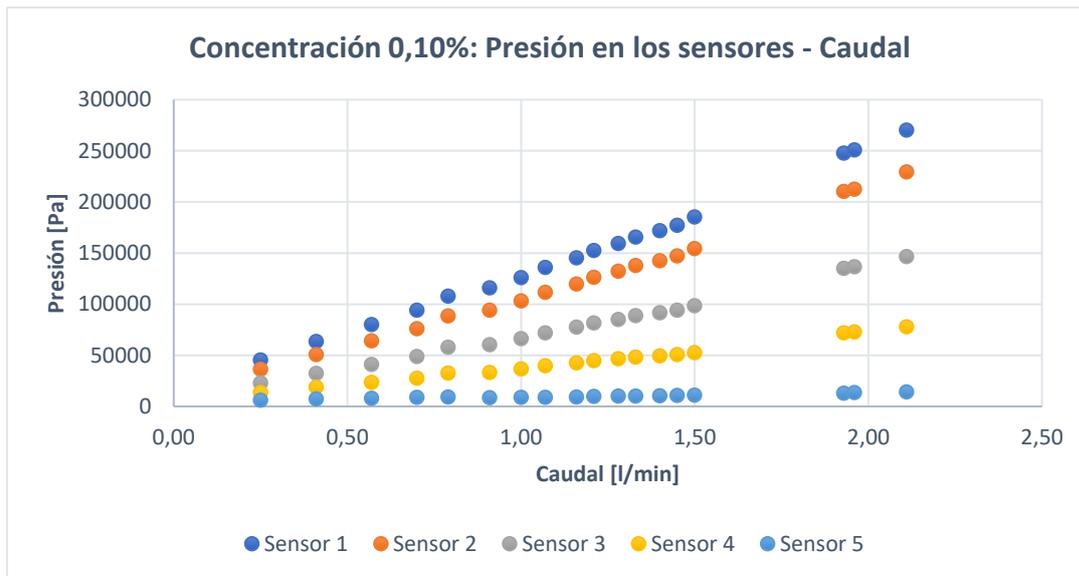


Figura 3.45: medición de la presión en los sensores del circuito para los distintos caudales de flujo con una solución polimérica de concentración 0,10%.

La falta de datos que se observan en la figura 3.45 entre los caudales 1,50 l/min a 1,90 l/min aproximadamente, se deben a un ajuste en la oclusión de la bomba peristáltica, lo que provocó un salto en el caudal de circulación por lo que no fue posible registrar datos dentro de este rango.

Se calculan los valores de los números de Reynolds teniendo en cuenta nuevamente que se trata de un fluido no newtoniano, el procedimiento y las fórmulas usadas son idénticos a los utilizados en el caso de la solución polimérica de 0,07% de concentración.

Los resultados obtenidos se observan en la tabla 3.25.

Tabla 3.25: valores de caudal (Q), viscosidad aparente (μ_a) y número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,10%.

Concentración 0,10%					
K [Pa sⁿ]	n	Q [l/min]	Vel. [m/s]	μ_a [Pa s]	Re
0,2610	0,4552	0,25	0,30	0,008261	152
		0,41	0,49	0,006310	327
		0,57	0,68	0,005273	544
		0,70	0,84	0,004714	747
		0,79	0,94	0,004414	901
		0,91	1,09	0,004087	1121
		1,00	1,19	0,003882	1297
		1,07	1,28	0,003741	1439
		1,16	1,38	0,003580	1631
		1,21	1,44	0,003499	1740
		1,28	1,53	0,003393	1898
		1,33	1,59	0,003323	2014
		1,40	1,67	0,003232	2180
		1,45	1,73	0,003171	2302
		1,50	1,79	0,003113	2425
		1,93	2,30	0,002713	3580
1,96	2,34	0,002690	3666		
2,11	2,52	0,002584	4109		

Se grafican las caídas de presión (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) (figura 3.46). Se puede observar como el comportamiento es similar que para la solución polimérica de 0,07% de concentración.

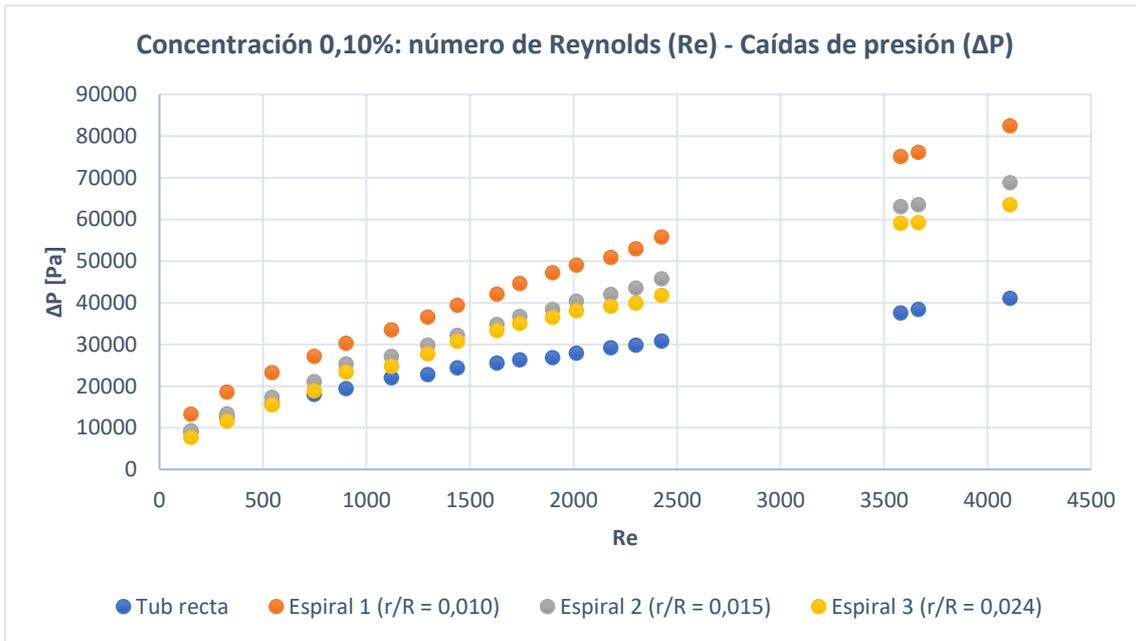


Figura 3.46: caídas de presión (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,10%.

Se calcula el factor de fricción de Fanning mediante las ecuaciones 25 y 29 según corresponda para el régimen de flujo. En el caso actual de 0,10% de concentración, el valor de Reynolds crítico (Re_c) es de 2394 (tabla 3.22).

Tabla 3.26: valores de caídas de presión (ΔP), número de Reynolds (Re) y factor de fricción de Fanning (ff) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,10%.

Concentración 0,10%								
Re	Tubería recta		Espiral 1 (r/R = 0,010)		Espiral 2 (r/R = 0,015)		Espiral 3 (r/R = 0,024)	
	ΔP [Pa]	f fanning	ΔP [Pa]	f fanning	ΔP [Pa]	f fanning	ΔP [Pa]	f fanning
152	9055	0,105053	13322	0,105053	9344	0,105053	7701	0,105053
327	12776	0,048924	18566	0,048924	13351	0,048924	11647	0,048924
544	15795	0,029408	23240	0,029408	17402	0,029408	15502	0,029408
747	18075	0,021411	27143	0,021411	21147	0,021411	18886	0,021411
901	19453	0,017762	30337	0,017762	25304	0,017762	23452	0,017762
1121	22063	0,014276	33535	0,014276	27177	0,014276	24775	0,014276
1297	22825	0,012341	36634	0,012341	29872	0,012341	27798	0,012341
1439	24432	0,011116	39429	0,011116	32261	0,011116	30764	0,011116
1631	25574	0,009812	42101	0,009812	34803	0,009812	33399	0,009812
1740	26297	0,009193	44618	0,009193	36753	0,009193	35044	0,009193
1898	26890	0,008428	47268	0,008428	38404	0,008428	36496	0,008428
2014	27924	0,007944	49069	0,007944	40416	0,007944	38139	0,007944
2180	29261	0,007339	50900	0,007339	42014	0,007339	39229	0,007339
2302	29890	0,006951	53027	0,006951	43589	0,006951	39951	0,006951
2425	30875	0,006345	55849	0,009182	45766	0,010032	41796	0,011452
3580	37603	0,004668	75126	0,007461	63082	0,008353	59088	0,009780
3666	38421	0,004625	76106	0,007328	63583	0,008163	59259	0,009510
4109	41124	0,004271	82466	0,006852	68821	0,007624	63563	0,008802

Gráficamente los resultados se muestran en la figura 3.47.

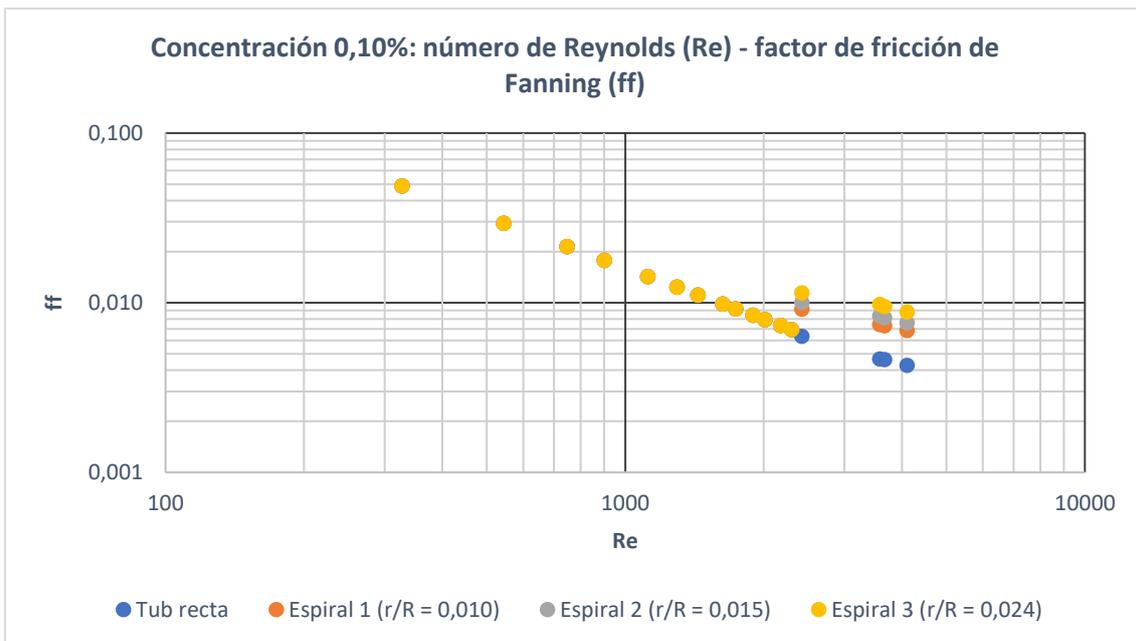


Figura 3.47: factor de fricción de Fanning (ff) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica con una concentración de 0,10%.

3.5.2.3. Solución polimérica de concentración 0,15%

Por último, se circula una solución polimérica con una concentración de 0,15%. El procedimiento es similar a los realizados en los casos anteriores.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3.27 y 3.28 y las figuras 3.48, 3.49 y 3.50.

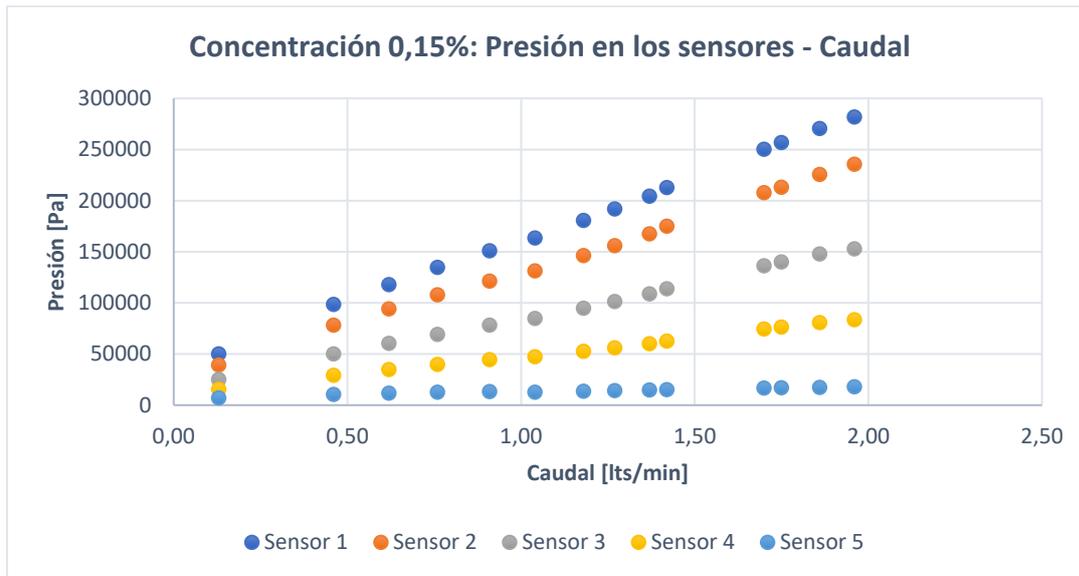


Figura 3.48: medición de la presión en los sensores del circuito para los distintos caudales de flujo con una solución polimérica de concentración 0,15%.

Tabla 3.27: valores de caudal (Q), viscosidad aparente (μ_a) y número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,15%.

Concentración 0,15%					
K [Pa·sn]	n	Q [l/min]	vel [m/s]	μ_a [Pa s]	Re
0,4740	0,4259	0,13	0,16	0,018138	36
		0,46	0,55	0,008781	264
		0,62	0,74	0,007398	422
		0,76	0,91	0,006582	581
		0,91	1,09	0,005935	772
		1,04	1,24	0,005497	952
		1,18	1,41	0,005113	1162
		1,27	1,52	0,004901	1304
		1,37	1,64	0,004693	1469
		1,42	1,69	0,004597	1555
		1,70	2,03	0,004146	2064
		1,75	2,09	0,004077	2160
		1,86	2,22	0,003937	2378
		1,96	2,34	0,003821	2582

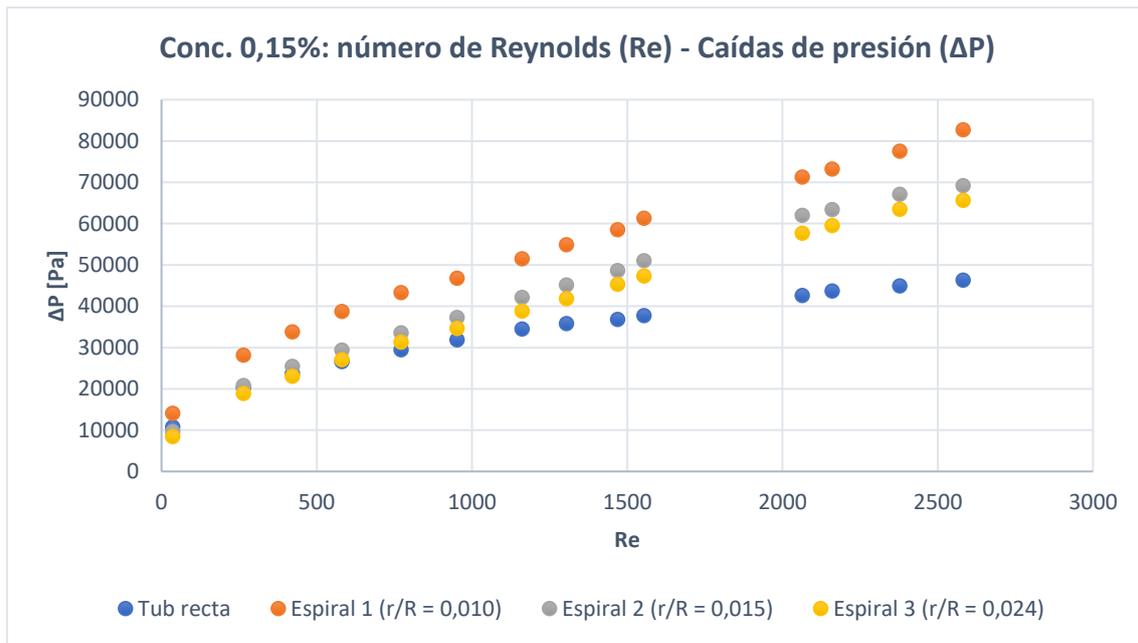


Figura 3.49: caídas de presión (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,15%.

Para este caso (concentración 0,15%) el valor de número de Reynolds crítico es de 2397 tal como muestra la tabla 3.22.

Tabla 3.28: valores de caídas de presión (ΔP), número de Reynolds (Re) y factor de fricción de Fanning (ff) para el flujo de una solución polimérica de concentración 0,15%.

Concentración 0,15%								
Re	Tubería recta		Espiral 1 ($r/R = 0,010$)		Espiral 2 ($r/R = 0,015$)		Espiral 3 ($r/R = 0,024$)	
	ΔP [Pa]	f fanning	ΔP [Pa]	f fanning	ΔP [Pa]	f fanning	ΔP [Pa]	f fanning
36	10764	0,443565	14110	0,443565	9737	0,443565	8461	0,443565
264	20321	0,060683	28182	0,060683	20842	0,060683	18920	0,060683
422	23798	0,037933	33838	0,037933	25488	0,037933	23106	0,037933
581	26673	0,027531	38786	0,027531	29433	0,027531	27064	0,027531
772	29518	0,020734	43307	0,020734	33584	0,020734	31336	0,020734
952	31894	0,016804	46820	0,016804	37300	0,016804	34693	0,016804
1162	34486	0,013774	51496	0,013774	42157	0,013774	38862	0,013774
1304	35804	0,012269	54903	0,012269	45185	0,012269	41872	0,012269
1469	36831	0,010889	58575	0,010889	48666	0,010889	45342	0,010889
1555	37777	0,010292	61355	0,010292	51098	0,010292	47361	0,010292
2064	42655	0,007753	71305	0,007753	62026	0,007753	57720	0,007753
2160	43684	0,007407	73221	0,007407	63438	0,007407	59542	0,007407
2378	44974	0,006729	77558	0,006729	67112	0,006729	63473	0,006729
2582	46352	0,005579	82776	0,007971	69209	0,008886	65654	0,010537

Debido a la alta viscosidad y la dificultad para poder bombear esta solución polimérica, solo se logra obtener un valor dentro del caudal en régimen turbulento, el cual corresponde al valor de Reynolds de 2582.

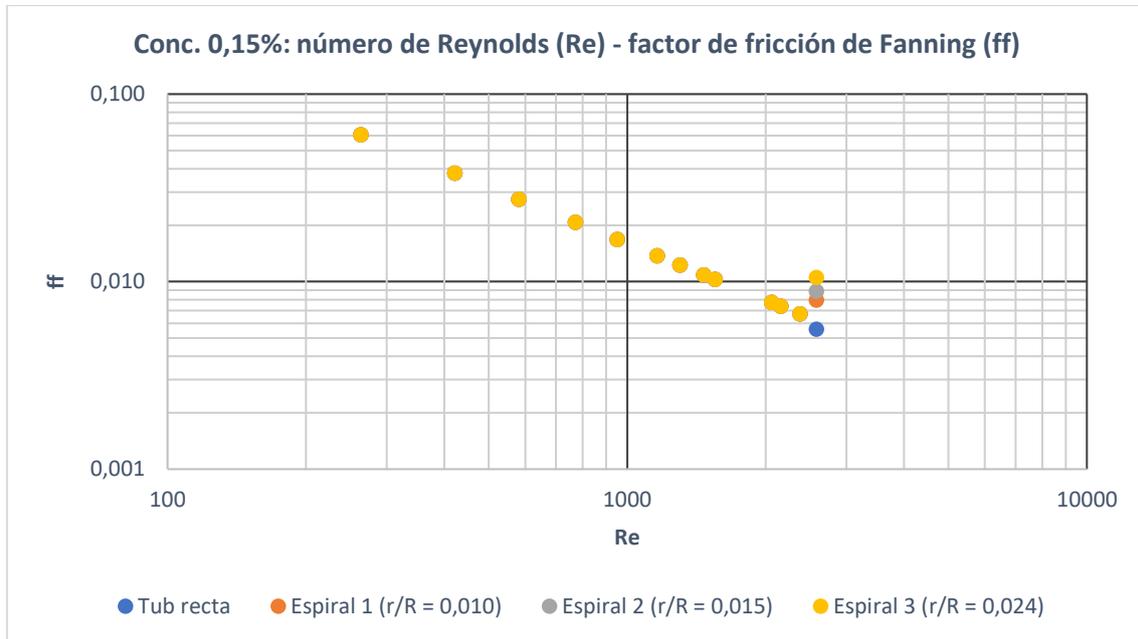


Figura 3.50: factor de fricción de Fanning (ff) en función del número de Reynolds (Re) para el flujo de una solución polimérica con una concentración de 0,15%.

En los tres casos para las distintas concentraciones, la espiral 3 con una configuración de relación de curvatura mayor ($r/R = 0,024$) presentó menores caídas de presión, pero al calcularse el factor de fricción, donde el valor es adimensional y ya no depende de los valores locales, la espiral 3 tiene un mayor valor de factor de fricción de Fanning en todos los casos.

Esto demuestra el efecto de la relación de curvatura sobre las pérdidas de fricción, donde existe una proporcionalidad directa entre ellas. A medida que la relación de curvatura aumenta, se observa un aumento en las pérdidas de carga, debido a la formación de flujos secundarios perpendiculares a la corriente principal, los cuales pueden caracterizarse mediante el número de Dean (Rao, 1999).

3.6. Reducción de pérdidas por fricción

En la sección 3.5 se calculó el valor de factor de fricción de Fanning para los casos de estudio de las soluciones poliméricas. En este capítulo se realizará una comparación de

estos valores en las distintas secciones del circuito, considerando que, por definición del factor de fricción, a medida que este es menor las pérdidas debidas a la fricción son menores.

El estudio de reducción a la fricción se hará únicamente en flujo turbulento, considerando para cada una de las soluciones su número crítico de Reynolds (tabla 3.22). Además, tal como se afirmó en capítulos anteriores, los reductores poliméricos son efectivos únicamente en régimen turbulento (sección 2.2).

Para el caso del valor de concentración de 0,07% se tienen cinco mediciones en régimen turbulento, y para las concentraciones de 0,10% y 0,15% se logró tener cuatro y una medición respectivamente.

Si se grafican estos puntos para cada uno de los tramos del circuito (tubería recta, espiral 1, espiral 2 y espiral 3), se puede analizar cómo es la evolución del factor de fricción dependiendo del número de Reynolds, comparando cada una de las soluciones en cada uno de los tramos.

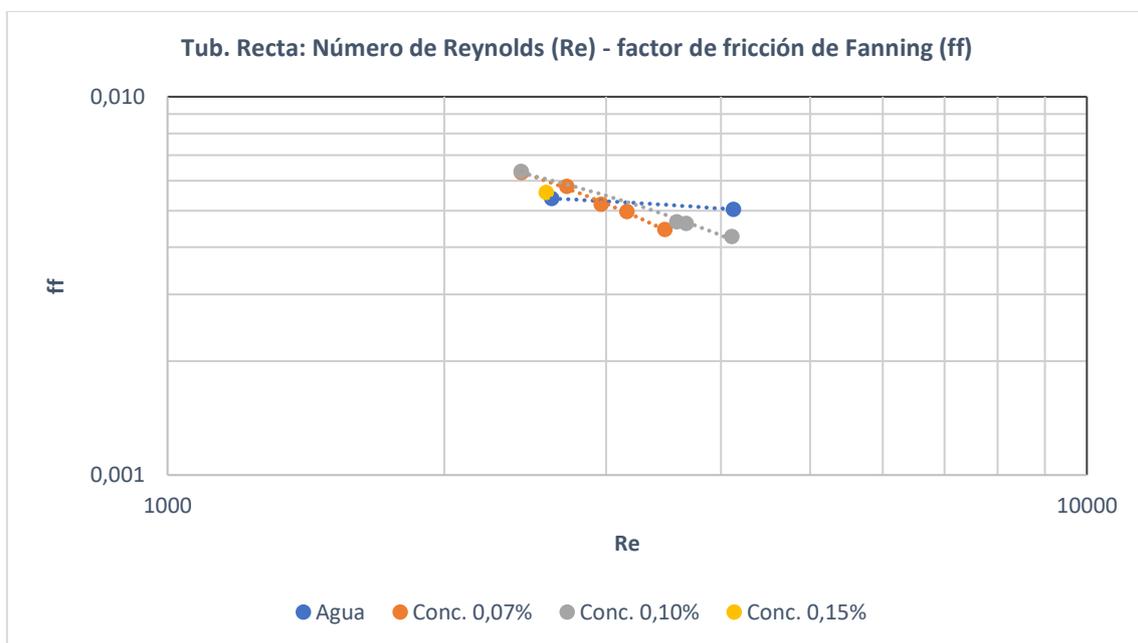


Figura 3.51: factores de fricción de Fanning (ff) en régimen turbulento para las distintas soluciones en tubería recta.

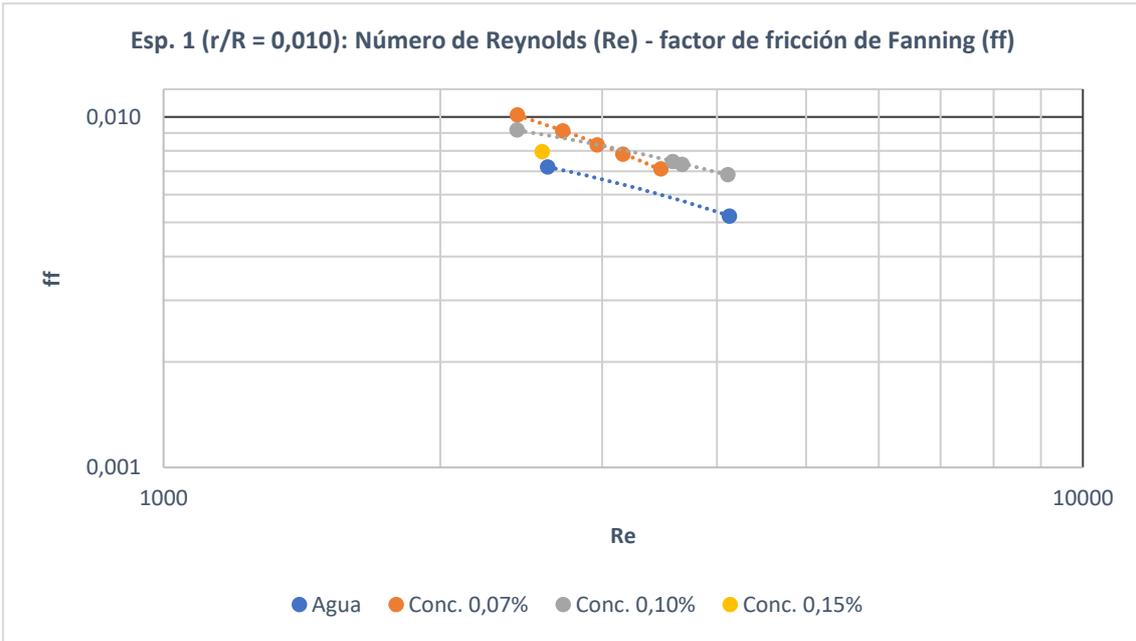


Figura 3.52: factores de fricción de Fanning (ff) en régimen turbulento para las distintas soluciones en espiral 1 ($r/R = 0,010$).

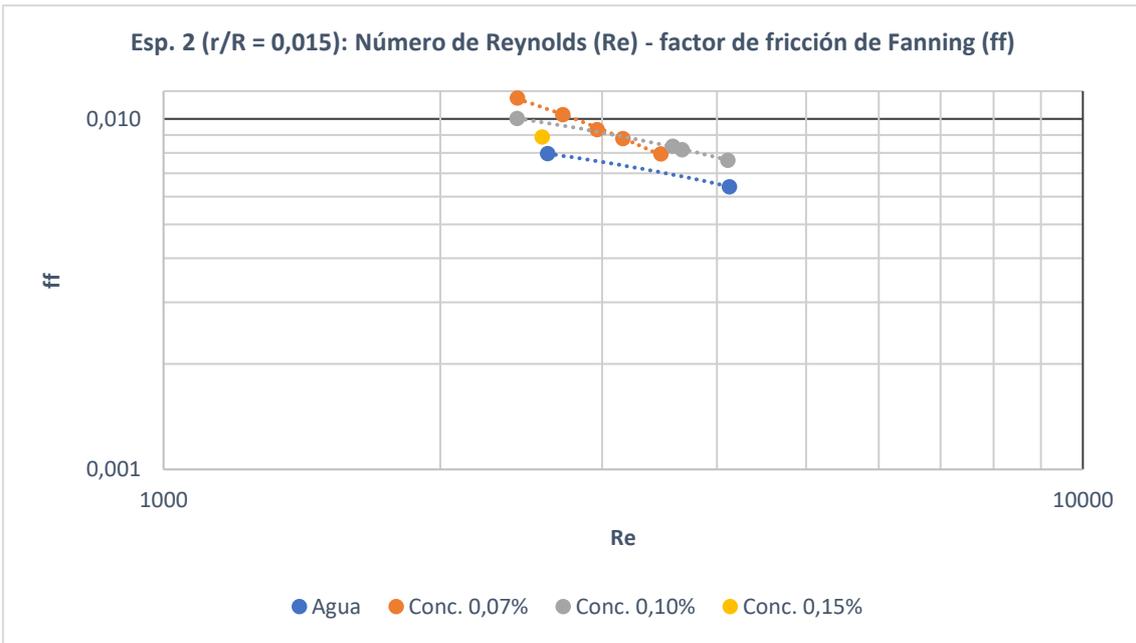


Figura 3.53: factores de fricción en régimen turbulento para las distintas soluciones en espiral 2 ($r/R = 0,015$).

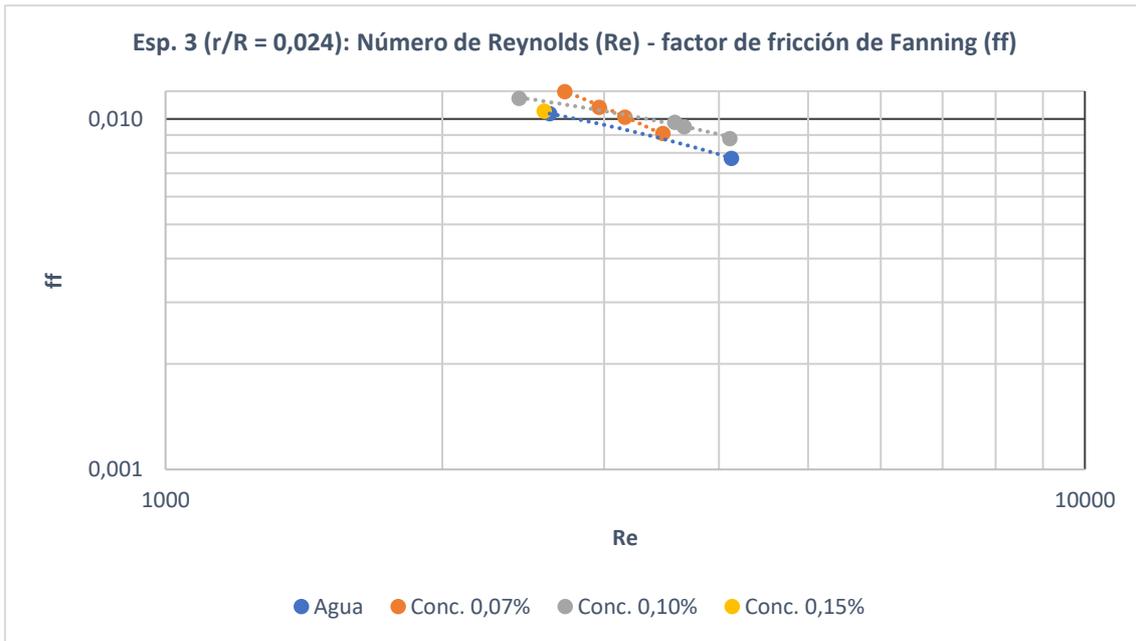


Figura 3.54: factores de fricción de Fanning (ff) en régimen turbulento para las distintas soluciones en espiral 3 ($r/R = 0,024$).

En este caso, para que exista una reducción en las pérdidas por fricción mediante el uso de los polímeros como agentes reductores, los valores del factor de fricción de Fanning de las distintas concentraciones tienen que ser menores que los valores que presenta el agua, ya que es el fluido que se utiliza como referencia en los ensayos realizados en este proyecto.

Si se analizan las gráficas de las figuras 3.51 a 3.54, se observa que esto solo sucede en el caso de la tubería recta, y para las concentraciones de 0,07% y 0,10%. No obstante, para los otros casos (espirales 1,2 y 3) se puede observar cómo la tendencia de las pendientes de las soluciones poliméricas da indicio que a determinados números de Reynolds se podría manifestar el efecto de reducción de las pérdidas por fricción.

Para el actual ensayo esto no se logró alcanzar debido a las limitaciones de la bomba, pero queda evidenciado que, de mantenerse la tendencia, a mayores números de Reynolds se obtendría la reducción.

Para determinar el **porcentaje de reducción a la fricción (RF)**, se compara los valores de los factores de fricción de Fanning de las soluciones poliméricas ($ff_{solución}$) obtenidos de los ensayos, con los valores del agua (ff_{agua}) a determinado número de Reynolds (Ec. 30).

$$RF = \left(1 - \frac{ff_{solucion}}{ff_{agua}}\right) \times 100 \quad [Ec. 30]$$

A partir de ahora únicamente se considera los resultados obtenidos para las soluciones de concentraciones 0,07% y 0,10% en tubería recta, ya que son las que exhiben números de factores de fricción más bajos que el agua. Estos valores corresponden a los tres últimos datos obtenidos de cada una de estas dos soluciones.

Para el cálculo del factor de fricción de Fanning del agua (ff_{agua}) en el número de Reynolds exacto que corresponde a cada una de las soluciones poliméricas, se utilizó la línea de tendencia que une los valores del factor de fricción del agua en tubería recta, entre los números de Reynolds de 2617 a 4127, que es el rango donde cruzan las líneas de tendencia de las soluciones poliméricas, alcanzando la disminución de los valores de factor de fricción con respecto al agua tal como se observa en la figura 3.51.

Los valores obtenidos de porcentaje de reducción se muestran en la tabla 3.29.

Tabla 3.29: porcentaje de reducción de pérdidas por fricción (RF) en tubería recta mediante el uso de soluciones poliméricas de concentraciones 0,07% y 0,10%.

Tubería recta				
Concentración	Re	ff agua	ff solución	RF
0,07%	2964	0,005287	0,005235	1%
	3160	0,005237	0,004919	6%
	3475	0,005165	0,004485	13%
0,10%	3580	0,005142	0,004710	8%
	3666	0,005124	0,004626	10%
	4109	0,005040	0,004242	16%

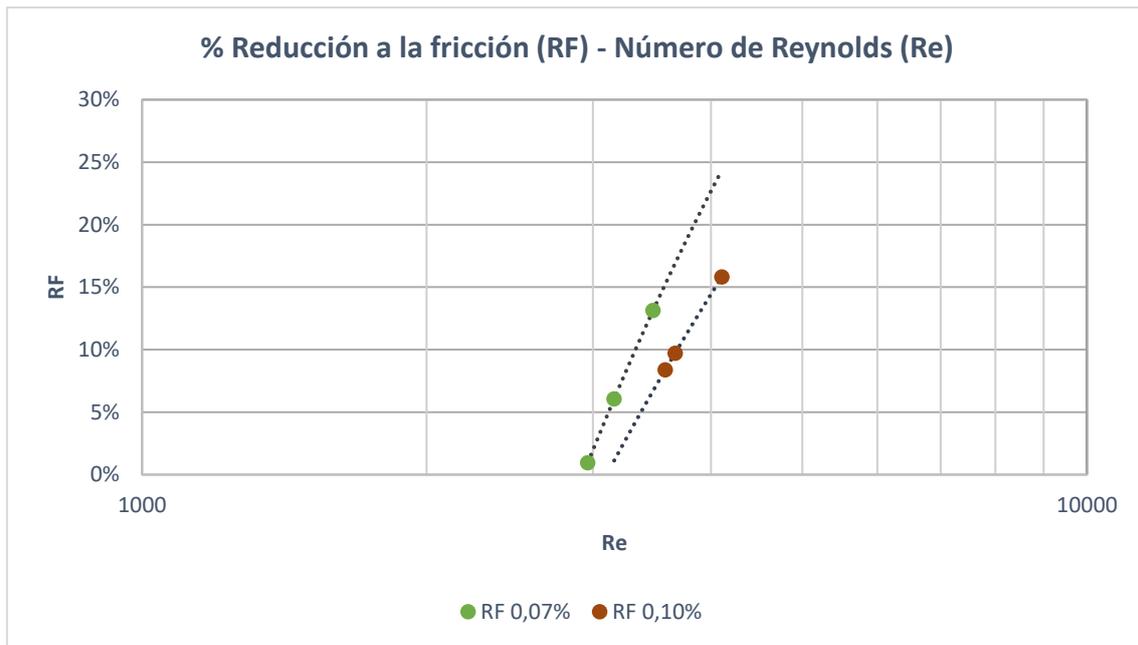


Figura 3.55: porcentaje de reducción de fricción (RF) para soluciones poliméricas en tubería recta.

Los resultados obtenidos muestran que, tras la circulación de las soluciones poliméricas, para concentraciones de 0,07% y 0,10% se logra una reducción de pérdidas por fricción de hasta un 13% y 16% respectivamente.

Además, las gráficas de las figuras 3.51 y 3.55 muestran cómo el efecto de reducción de las pérdidas por fricción (RF) se manifiestan más rápidamente (menores números de Reynolds) en la solución polimérica de menor concentración (0,07%) empezando a actuar antes como agente reductor de fricción.

4. Conclusiones

Tras la circulación de las soluciones poliméricas por el circuito, se obtiene una reducción de las pérdidas por fricción para los casos de concentraciones del 0,07% y 0,10%, logrando hasta un 13% y 16% de reducción, respectivamente. Se condice con la función de los polímeros como agentes reductores de fricción en el flujo turbulento. En contraste, durante el régimen laminar las pérdidas fueron mayores en comparación con el agua para un mismo caudal debido al cambio de las propiedades del fluido (aumento de la viscosidad aparente).

Las gráficas que representan la evolución de las caídas de presión con la variación del caudal (figuras 4.1 a 4.4), muestran claramente este comportamiento (mayores pérdidas durante el régimen laminar).

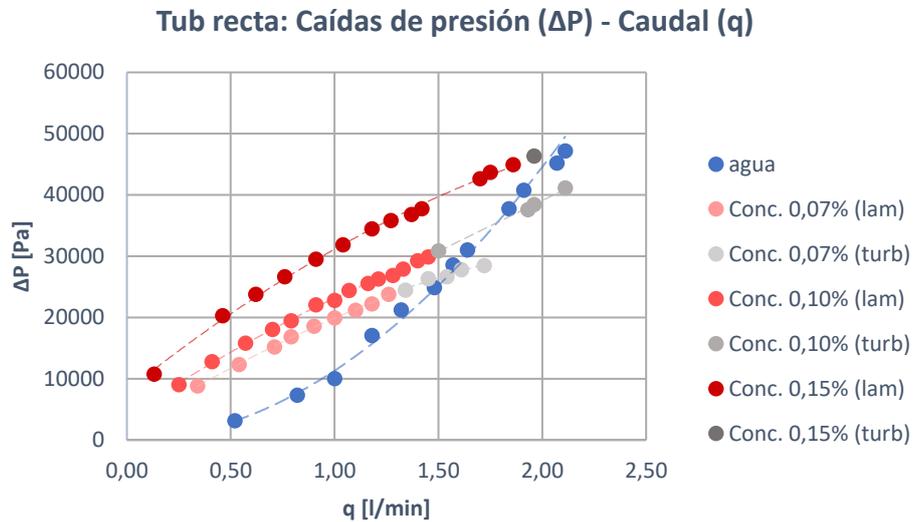


Figura 4.1: caídas de presión (ΔP) en función del caudal (q) sobre la tubería recta para las soluciones.

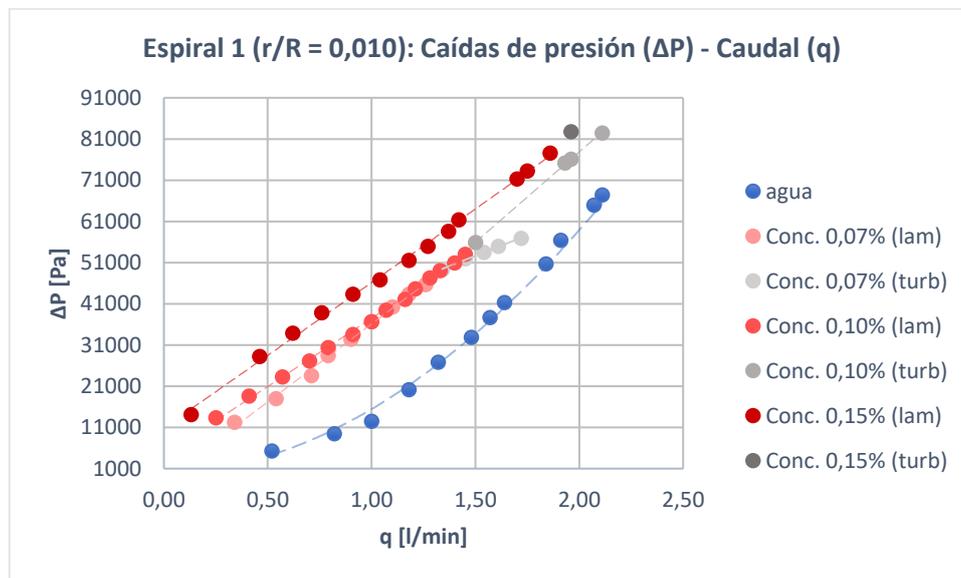


Figura 4.2: caídas de presión (ΔP) en función del caudal (q) sobre la espiral 1 ($r/R = 0,010$) para las soluciones.

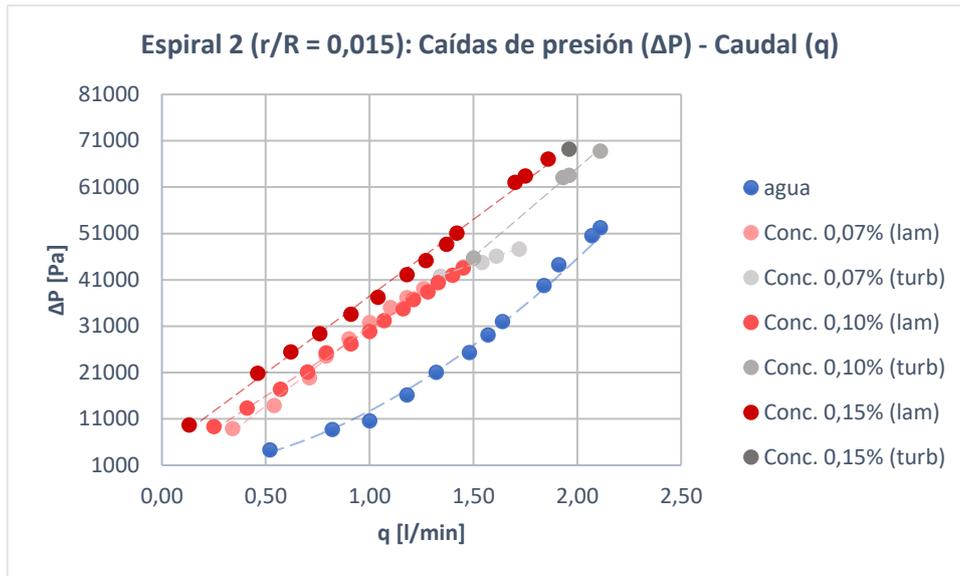


Figura 4.3: caídas de presión (ΔP) en función del caudal (q) sobre la espiral 2 ($r/R = 0,015$) para las soluciones.

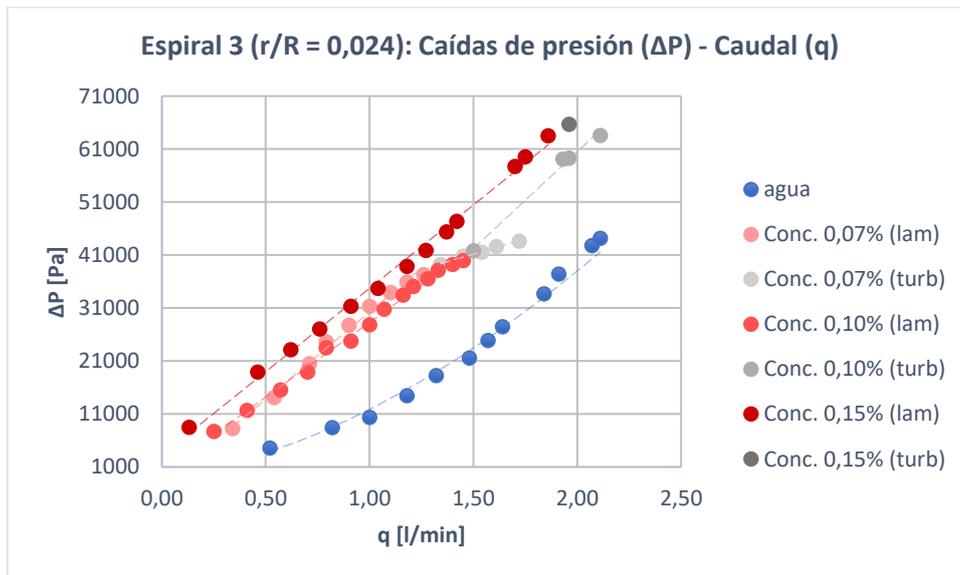


Figura 4.4: caídas de presión (ΔP) en función del caudal (q) sobre la espiral 3 ($r/R = 0,024$) para las soluciones.

Además, los gráficos de las figuras 4.1 a 4.4 muestran cómo los datos del agua tienen una relación no lineal en comparación con las soluciones poliméricas. Este comportamiento lo explica H. G. L. Hagen, quien demostró experimentalmente que las caídas de presión tienen una relación lineal con la velocidad media (equivalente con el caudal) para régimen laminar, y una relación potencial con exponente de hasta 2 para el régimen turbulento (White, 2004).

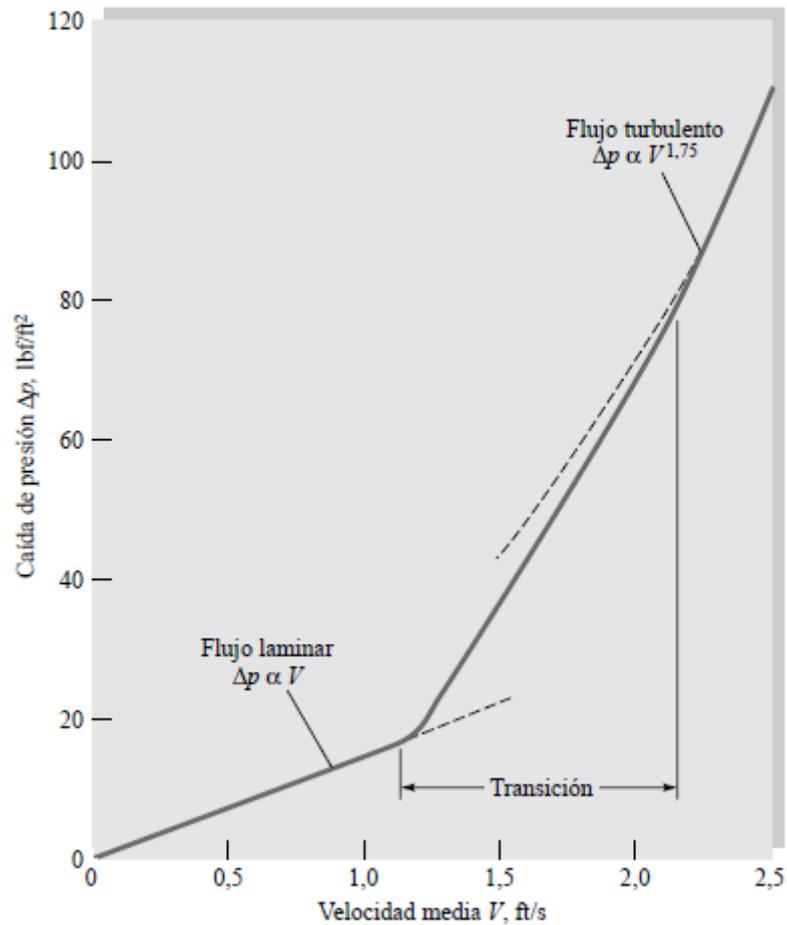


Figura 4.5: evidencia experimental de la transición en un flujo de agua por un tubo liso (White, 2004).

Los resultados obtenidos con el agua concuerdan con los resultados experimentales para un fluido newtoniano (figura 4.5), confirmando que la tendencia no lineal del agua se debe a que está dentro del régimen turbulento, tal como se vio en la sección 3.5.1.

Tomando como caso particular los resultados obtenidos para el tramo de tubería recta, se observa en detalle como son las tendencias de las caídas de presión en función del número de Reynolds, antes y después de superar el valor de número de Reynolds crítico (Re_c) (figuras 4.6 a 4.9).

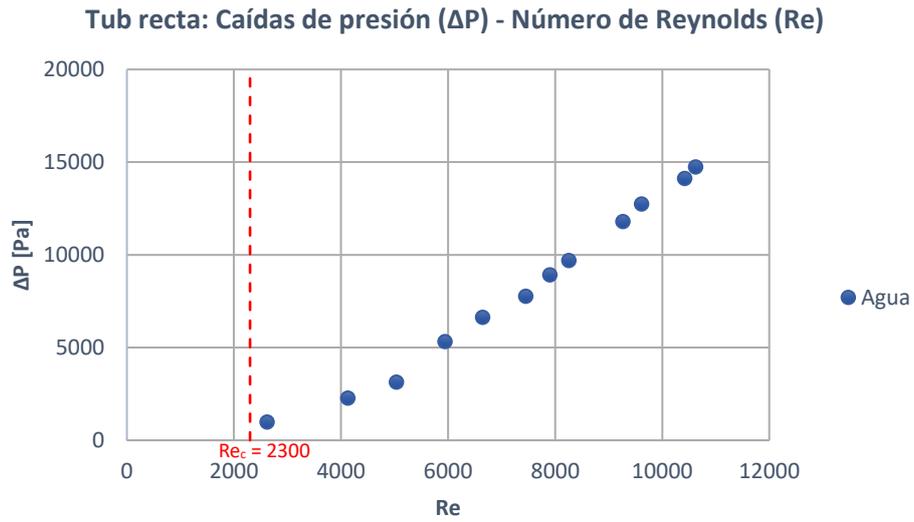


Figura 4.6: caídas de presión del agua (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para la tubería recta.

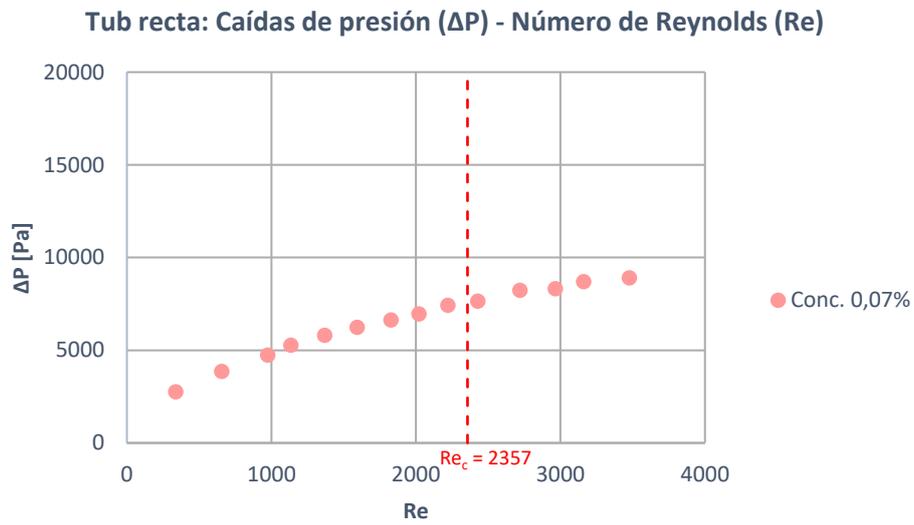


Figura 4.7: caídas de presión solución polimérica 0,07% (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para la tubería recta.

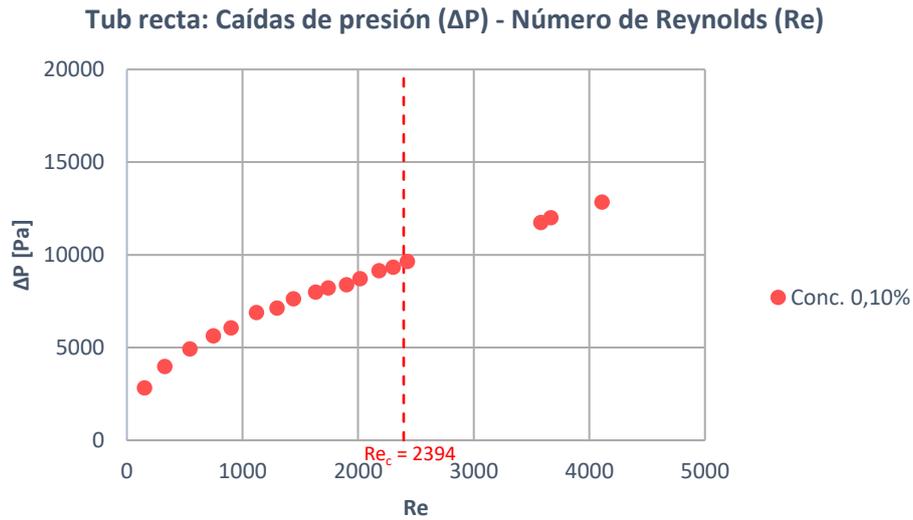


Figura 4.8: caídas de presión solución polimérica 0,10% (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para la tubería recta.

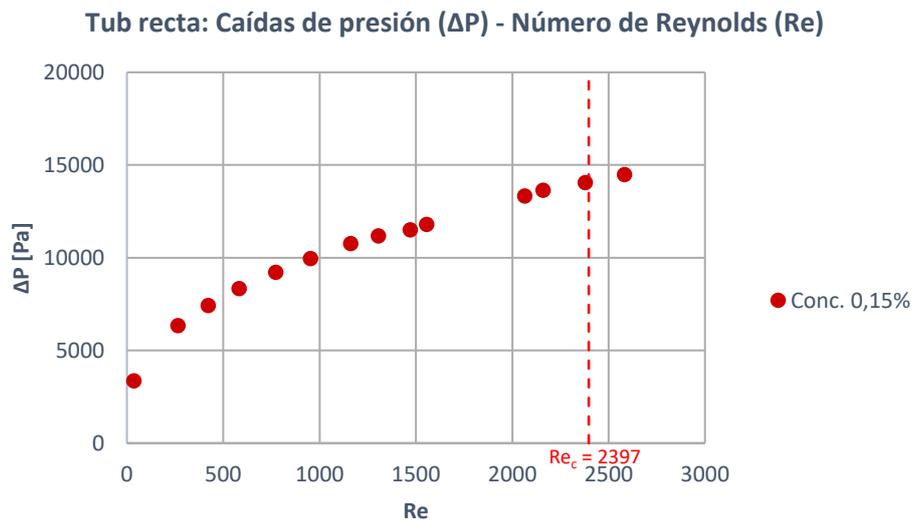


Figura 4.9: caídas de presión solución polimérica 0,15% (ΔP) en función del número de Reynolds (Re) para la tubería recta.

Los gráficos de las figuras 4.7 a 4.9 para las soluciones poliméricas en tubería recta muestran como a pesar de tener datos de caídas de presión (ΔP) por encima del número de Reynolds crítico (Re_c), no se obtiene la relación potencial que se esperaría para el régimen turbulento, tal como si sucede en el caso del agua (figura 4.6). Lo que indica que la zona de régimen turbulento alcanzada por las soluciones poliméricas no está completamente desarrollada.

En cuanto al efecto del radio de curvatura, como se demostró en la sección 3.5.2, para mayores relaciones de curvatura se tienen mayores valores de factor de fricción de Fanning, lo que resulta en mayores pérdidas debido a la fricción.

Con respecto a la reología, los ensayos realizados (sección 3.4.1.) indican que las propiedades reológicas se mantienen en las circunstancias evaluadas (tiempo en reposo y tiempo en agitación). Pero se destaca que existe una ligera reducción de la viscosidad aparente a bajas velocidades de corte, debido a efectos viscoelásticos y esfuerzos residuales en las soluciones poliméricas.

También se realizó una evaluación reológica de las soluciones poliméricas previa y posteriormente a la circulación dentro del circuito. Los resultados muestran una leve disminución en la viscosidad aparente posterior a la circulación por el circuito.

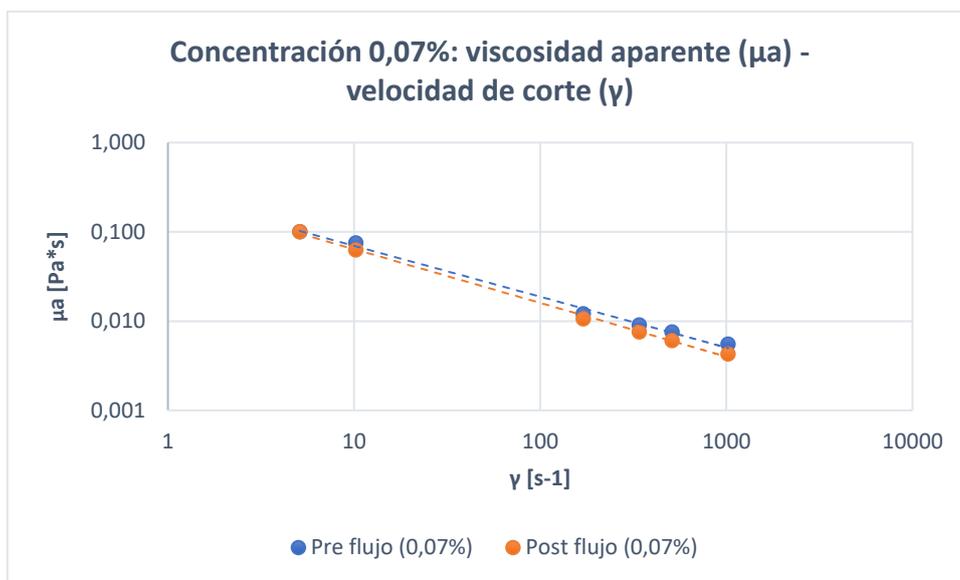


Figura 4.10: reología de la solución polimérica de concentración 0,07% antes y después del flujo por el circuito.

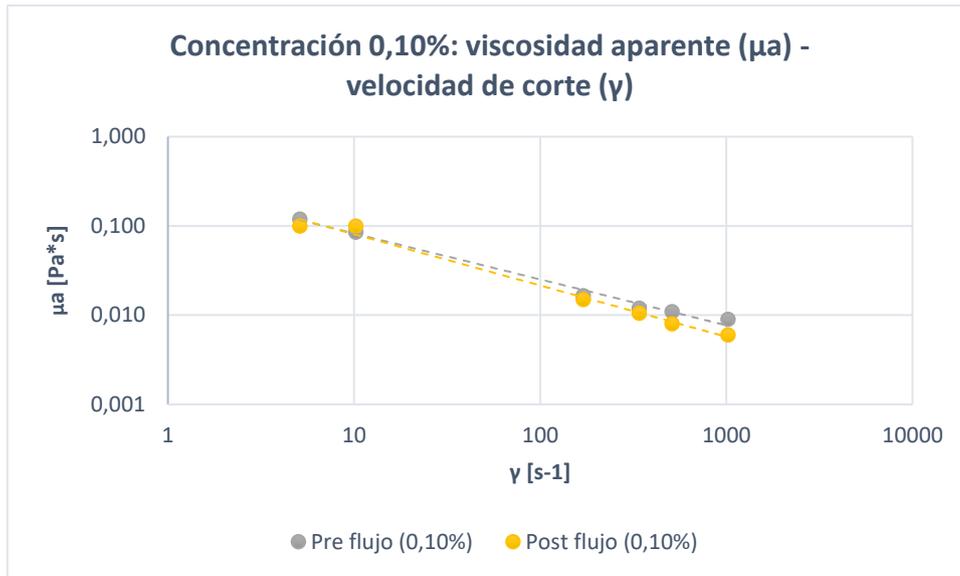


Figura 4.11: reología de la solución polimérica de concentración 0,10% antes y después del flujo por el circuito.

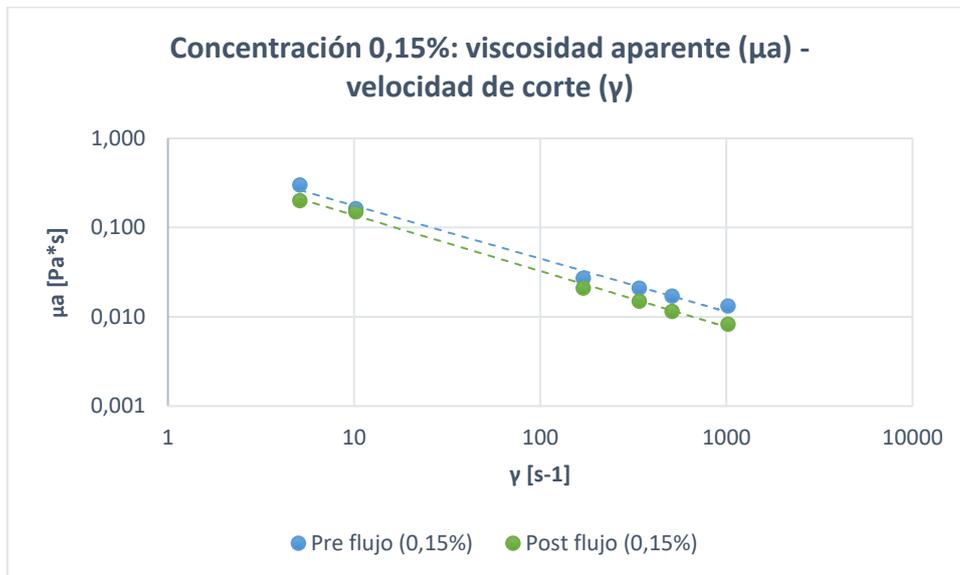


Figura 4.12: reología de la solución polimérica de concentración 0,15% antes y después del flujo por el circuito.

Las figuras 4.10 y 4.11 para las soluciones poliméricas de 0,07% y 0,10% de concentración muestran que la reología se mantiene similar antes y después del flujo, con una ligera disminución a altas velocidades. Sin embargo, la figura 4.12 indica que para la solución polimérica de 0,15%, existe una variación en las propiedades reológicas ya que la viscosidad aparente ha disminuido ligeramente posterior al flujo. Para confirmar realmente el fenómeno que llevo a la ligera disminución en la reología se deben hacer ensayos más detallados con ese propósito.

Finalmente, debido a las condiciones de la bomba, no se pudo llegar a obtener valores de número de Reynolds mayores que permitan efectuar otro tipo de análisis, por ejemplo, valores de concentración óptimos, porcentajes de reducción máximos y momento en los que se efectúa la reducción de pérdidas bajo el efecto de la relación de curvatura. Se sugiere en futuros proyectos realizar ensayos que permitan obtener este tipo de valores. Además, se podría optar por tomar valores de concentración más bajos y estudiar su comportamiento. Junto con ensayos que permitan confirmar hipótesis que se plantean en este proyecto con respecto a la disminución de las propiedades reológicas de las soluciones poliméricas.

Bibliografía

- Arco. (19 de agosto de 2019). *¿Qué es la pérdida de carga en tuberías?* Obtenido de Arco: <https://blog.valvulararco.com/que-es-la-perdida-de-carga-en-tuberias>
- AtlasScientific. (27 de febrero de 2023). *Understanding The Relationship Between Flow And Pressure*. Obtenido de AtlasScientific: <https://atlas-scientific.com/blog/relationship-between-flow-and-pressure/>
- Ba Geri, M., Imqam, A., & Flori, R. (2019). A Critical Review of Using High Viscosity Friction Reducers as Fracturing Fluids for Hydraulic Fracturing Applications. *SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium*. Oklahoma, USA. doi:10.2118/195191-MS
- Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (1999). *Non-Newtonian Flow in the Process Industries*. Butterworth Heinemann.
- Connor, N. (30 de Septiembre de 2019). *¿Qué es la aspereza relativa de la tubería? Definición*. Obtenido de Thermal Engineering: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-aspereza-relativa-de-la-tuberia-definicion/>
- Fernández Osma, M. (7 de Octubre de 2019). *Flujo Laminar y turbulento*. Obtenido de Aerodinamica F1: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>
- Fernández Osma, M. (12 de Octubre de 2020). *¿Qué es el número de Reynolds?* Obtenido de Aerodinámica F1: <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/10/que-es-el-numero-de-reynolds/>
- FESMEX Blog. (22 de Enero de 2020). *Pérdidas por fricción en tuberías*. Obtenido de FESMEX: <https://www.fesmex.com.mx/article/perdidas-por-friccion-en-tuberias/#:~:text=El%20n%C3%BAmero%20de%20Reynolds%20permite,4000%2C%20el%20flujo%20ser%C3%A1%20turbulento>
- González, M. I. (2011). *Ajuste de modelos para la descripción reológica de lodos de perforación base bentonita - agua*. Neuquén, Argentina.
- Guachún L., F. P., & Guzñay P., S. J. (2020). Introducción a la mecánica de fluidos. En F. P. Guachún L., & S. J. Guzñay P., *Introducción a la mecánica de fluidos* (pág. 20). Ecuador: CIDEPRO. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28482/PFC_Esther_Pascual_Gutierrez.pdf?sequence=1
- Hermida, É. (2011). *Polímeros*. Buenos Aires, República Argentina: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Lifeder. (17 de Febrero de 2022). Obtenido de Lifeder: <https://www.lifeder.com/monomeros/>
- LiquidPower Specialty Products Inc. (2024). *Acerca del DRA y cómo funciona*. Obtenido de LSPI: <https://www.liquidpower.es/what-is-dra/about-dra-and-how-it-works/>
- LiquidPower Specialty Products Inc. (2024). *Beneficios del DRA*. Obtenido de LSPI: <https://www.liquidpower.es/what-is-dra/dra-benefits/>

- mexpolimeros. (s.f.). *Propiedades de flujo de los polímeros fundidos*. Obtenido de mexpolimeros:
<https://www.mexpolimeros.com/lab/flujo%20de%20los%20pol%C3%ADmeros.html>
- Rao, B. (1999). *Coiled Tubing Hydraulics Modeling*. Conroe, Texas.
- Resolute Oil. (s.f.). *Friction Reducer in Slick Water Applications*. Obtenido de Resolute Oil:
<https://resoluteoil.com/applications/oil-and-gas/friction-reducer/#:~:text=Friction%20reducers%20help%20make%20the,boosting%20the%20hydraulic%20fluid's%20viscosity>
- Sameer, A.-H., Berihun, M. N., Md Motiur, R., Mohammed, H., & Tareq, M. A.-S. (2022). Perspective Review of Polymers as Additives in Water-Based Fracturing Fluids. *ACS Omega*, 7431-7443. doi:10.1021/acsomega.1c06739
- Shah, S. N., Kamel, A. H., & Zhou, Y. (Septiembre de 2006). Drag reduction characteristics in straight and coiled tubing - An experimental study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 53(3-4), 179 - 188. doi:<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.05.004>
- Sher, I., & Hetsroni, G. (2008). A mechanistic model of turbulent drag reduction by additives. *Chemical Engineering Science*, 63(7), 1771-1778. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.11.035>.
- Tecnoproducts. (30 de Enero de 2023). *TECNOPRODUCTS*. Obtenido de ¿Como funciona una bomba persitaltica?: <https://tecno-products.com/blog/novedades/conduccion/como-funciona-una-bomba-peristaltica/>
- White, F. M. (2004). *Mecanica de Fluidos*. En F. M. White, *Mecanica de Fluidos* (5a ed.). McGraw-Hill INTERAMERICANA.
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2009). *Fisica Universitaria volumen 1*. En H. D. Young, & R. A. Freedman, *Fisica Universitaria volumen 1*. México: Pearson.