

# COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Predicción del comportamiento reológico de un gel polimérico basado en poliacrilamida parcialmente hidrolizada y entrecruzador orgánico en un medio poroso

Brayan Farid Aguilar Rubial

Trabajo de Grado para optar el Título de Ingeniero de Petróleos

Director (a)

María Isabel Sandoval Martínez

Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

Codirectores

Juan Diego Ceballos Payares

Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

Sonia Alejandra Quintero Antolínez

Geóloga

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2025

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Dedicatoria**

*A Dios, por ser mi fuente de sabiduría, paz y amor incondicional.*

*A mis padres: Gladys Rubial y Reinel Aguilar. Por su apoyo, dedicación, esfuerzo y amor sin fronteras. Esto es por y para ustedes. Estamos cumpliendo un sueño juntos.*

*A la familia Rubial Vega, quienes han sido ejemplo de disciplina y perseverancia. Gracias por su constante apoyo y amor. A mi primo-hermano y colega César A. Rubial. Quien siempre fue sinónimo de paciencia y optimismo en los momentos de incertidumbre, por su colaboración y apoyo incondicional.*

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Agradecimientos**

*A mi directora, María Isabel, por sus valiosas ideas y cuestionamientos, orientación y contante motivación en este proceso. Gracias por siempre creer en mi e inspirarme a seguir aprendiendo y aportando a la industria.*

*A mis codirectores Juan Diego Ceballos y Sonia Quintero, por su apoyo durante este proceso, las enseñanzas y por su amistad.*

*Al grupo de investigación Recobro Mejorado, por fomentar la excelencia, espacios de debate del conocimiento y amor a la investigación. También por brindarme personas maravillosas y admirables. Los amo y siempre los llevo en mi corazón, siempre GRM.*

*Al grupo de investigación FIRTS, por brindarme sus instalaciones y disposición de su personal, cuyo apoyo y colaboración fueron fundamentales para la culminación de este proyecto.*

*A la Ingeniera y amiga Valeria Salgado por su acompañamiento y colaboración en cada fase de este proyecto.*

*A los ingenieros Andrés Ramírez y José Luis por su compromiso, disposición y estrategias para la culminación de las pruebas experimentales de manera exitosa.*

*A la Ingeniera Paola Dávila, por sus constantes palabras de aliento y recordatorios: ¿Y para cuándo la tesis?, me impulsaban a no desistir y continuar con más velocidad.*

*A la Ingeniera Paola Díaz, mi jefe y amiga. Gracias por enseñarme que la vida es para aventurarse a hacer lo que muchos no se atreven por miedo. Gracias por siempre creer y confiar en mí.*

*A mis amigos que permanecieron y que siempre me dieron aliento y motivación en los momentos más complicados. Gracias por las risas y momentos inolvidables. Son unos seres con una calidad humana de otro planeta: Angelica, Javier, Gabs, Juli, Silvia, Elian, Laura, Sylvana, Ana, Dani, Val.*

*A mis tíos, tías y primos. Por siempre ser y estar. Los amo: Sergio, Diana, Edwin, Paola, Juli, Nayeth, Gisi, César, Val, Héctor y Julio*

*A la Universidad Industrial de Santander, por brindarme los espacios y herramientas para mi formación académica y desarrollo personal. A mis profesores, en especial a la Doctora, Olga Ortiz, por sus consejos y constante apoyo.*

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Tabla de contenido**

Introducción .....	10
1. Generalidades de la investigación.....	12
1.1. Planteamiento del problema.....	12
1.2. Antecedentes de la investigación .....	13
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. Objetivo General.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	18
2. Marco teórico .....	19
2.1 Gel polimérico .....	19
2.1.1. Geles con entrecruzadores inorgánicos.....	22
2.1.2. Geles con entrecruzadores orgánicos.....	22
2.2 Factores que afectan la cinética de gelificación.....	24
2.2.1 Efecto de la temperatura .....	24
2.2.2 Efecto del pH inicial .....	25
2.2.3 Efecto de la salinidad .....	26
2.2.4 Efecto de la concentración del polímero.....	27
2.2.5 Efecto de la concentración del entrecruzador .....	28
2.3 Medición del tiempo de gelificación.....	28

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

2.4	Evaluación reológica.....	32
2.4.1	Reómetro.....	34
2.5	Modelos reológicos.....	41
2.5.1	Modelo de la ley de potencia .....	41
2.5.2	Modelo de Carreau.....	43
2.5.3	Modelo de Canela .....	43
3.	Metodología .....	44
3.1.	Fase I: Preparación, selección y medición de propiedades de la solución.....	44
3.1.1	Procedimiento para la preparación de geles poliméricos.....	45
3.1.2	Medición del tiempo de gelificación y comportamiento reológico del gel .....	49
3.2.	Fase 2: Pruebas de desplazamientos .....	51
3.2.1.	Preparación y acondicionamiento del medio poroso para la inyección de la solución polimérica .....	52
3.2.2.	Medición de la porosidad efectiva .....	53
3.2.3.	Medición de la permeabilidad absoluta al agua.....	54
3.2.4.	Inyección de la solución polimérica .....	56
3.2.5.	Inyección del gel polimérico.....	56
3.3.	Fase 3: Ajuste prueba del reómetro y pruebas de desplazamiento .....	59
4.	Análisis de resultados .....	59
4.1.	Fase 1: Preparación, selección y medición de propiedades de la solución.....	60

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

4.2. Fase 2: Pruebas de desplazamientos .....	73
4.3. Fase 3: Ajuste prueba del reómetro y pruebas de desplazamiento .....	78
5. Conclusiones .....	88
6. Recomendaciones .....	89
Referencias bibliográficas.....	90
Apéndices.....	101

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Lista de Tablas**

Tabla 1 <i>Códigos de rigidez del gel según el método de la botella.</i> .....	31
Tabla 2 <i>Propiedades del polímero</i> .....	45
Tabla 3 <i>Puntos de caudal y diferencial de presión para la inyección de polímero</i> .....	55
Tabla 4 <i>Puntos de caudal y diferencial de presión para la inyección del gel</i> .....	57
Tabla 5 <i>Tiempo de gelificación test de Sydansk – Variación de PEI y KCl – SNF 10000 ppm.</i> ..	63
Tabla 6 <i>Tiempo de gelificación test de Sydansk – Variación de PEI y KCl – SNF 15000 ppm.</i> ..	63
Tabla 7 <i>Tiempo de gelificación test de Sydansk – Variación de PEI y KCl – SNF 20000 ppm.</i> ..	63
Tabla 8 <i>Tasas de inyección de la solución polimérica</i> .....	74
Tabla 9 <i>Tasas de inyección de la solución gelificante</i> .....	75
Tabla 10 <i>Tasa de cizallamiento aparente de la solución polimérica</i> .....	81
Tabla 11 <i>Tasa de cizallamiento aparente de la solución gelificante</i> .....	84

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

## Lista de Figuras

Figura 1 Adición incremental del polímero LMW a la carga base de polímero HMW .....	15
Figura 2 Estructura molecular de un polímero de poliacrilamida. ....	21
Figura 3 Estructura molecular de PAM y HPAM. ....	22
Figura 4 Estructura de la polietilenimina: lineal – ramificada .....	23
Figura 5 Comportamiento de la viscosidad aparente de una solución gelificante en función del tiempo.....	30
Figura 6 Escala visual del método de la botella propuesta por Sydansk .....	32
Figura 7 Comportamiento reológico de fluido reofluidizante .....	33
Figura 8 Reómetro MCR 302 .....	34
Figura 9 Geometría de medición – cilindros concéntricos. ....	37
Figura 10 Geometría de medición – platos paralelos.....	38
Figura 11 Geometría de medición – plato-cono. ....	39
Figura 12 Geometría de medición – doble hueco. ....	40
Figura 13 Efecto de vórtice en el proceso de agitación de la solución polimérica .....	47
Figura 14 Preparación del gel polimérico.....	48
Figura 15 Geometría cilindros concéntricos con hélice helicoidal / Geometría cono - plato .....	50
Figura 16 Esquema del empaque de arena construido. ....	52
Figura 17 Permeabilidad absoluta al agua para la inyección de la solución polimérica.....	56
Figura 18 Permeabilidad absoluta al agua para la inyección del gel.....	58
Figura 19 Estado inicial de geles poliméricos .....	62
Figura 20 Estado de los sistemas gelificantes después de 8 horas de monitoreo.....	65

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Figura 21 <i>Tiempo de gelificación gel SNF 10000 ppm – PEI 4:1 – KCl 1:1</i> .....	67
Figura 22 <i>Reograma solución polimérica – reómetro</i> .....	69
Figura 23 <i>Reograma de la solución gelificante – reómetro</i> .....	69
Figura 24 <i>Ajuste al modelo de Ley de Potencia de la solución polimérica</i> .....	70
Figura 25 <i>Ajuste al modelo de Ley de Potencia de la solución gelificante polimérico</i> .....	71
Figura 26 <i>Comparación del comportamiento reológico de los fluidos</i> .....	73
Figura 27 <i>Comportamiento de la viscosidad de la solución polimérica HPAM vs tasa de inyección</i> .....	77
Figura 28 <i>Comportamiento de la viscosidad gel polimérico vs tasa de inyección</i> .....	78
Figura 29 <i>Correlación de los datos del reómetro con las pruebas de desplazamiento de la solución polimérica</i> .....	81
Figura 30 <i>Correlación de los datos del reómetro con las pruebas de desplazamiento de la solución gelificante</i> .....	83
Figura 31 <i>Reología de los efluentes de la solución polimérica en el medio poroso</i> .....	85
Figura 32 <i>Reología de los efluentes de la solución gelificante en el medio poroso</i> .....	86
Figura 33 <i>Reología de los efluentes de la solución gelificante en la línea de inyección o tubería</i> .....	86

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Lista de Apéndices**

Apéndice 1	<i>Códigos de Sydansk gel de 10000 ppm. KCL 2:1, PEI: 2:1</i>	101
Apéndice 2	<i>Códigos de Sydansk gel de 10000 ppm. KCL 1:1, PEI: 2:1</i>	102
Apéndice 3	<i>Códigos de Sydansk gel (mezcla) de 10000 ppm. KCL 2:1, PEI: 4:1</i>	102
Apéndice 4	<i>Códigos de Sydansk gel (mezcla) de 10000 ppm. KCL 1:1, PEI: 4:1</i>	103
Apéndice 5	<i>Códigos de Sydansk gel de 15000 ppm. KCL 2:1, PEI: 2:1</i>	104
Apéndice 6	<i>Códigos de Sydansk gel de 15000 ppm. KCL 1:1, PEI: 2:1</i>	105
Apéndice 7	<i>Códigos de Sydansk gel de 15000 ppm. KCL 2:1, PEI: 4:1</i>	106
Apéndice 8	<i>Códigos de Sydansk gel de 15000 ppm. KCL 1:1, PEI: 4:1</i>	107
Apéndice 9	<i>Códigos de Sydansk gel de 20000 ppm. KCL 2:1, PEI: 2:1</i>	108
Apéndice 10	<i>Códigos de Sydansk gel de 20000 ppm. KCL 1:1, PEI: 2:1</i>	109
Apéndice 11	<i>Códigos de Sydansk gel de 20000 ppm. KCL 2:1, PEI: 4:1</i>	110
Apéndice 12	<i>Códigos de Sydansk gel (mezcla) de 20000 ppm. KCL 1:1, PEI: 4:1</i>	111

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### Resumen

**Título:** Predicción del comportamiento reológico de un gel polimérico basado en poliacrilamida parcialmente hidrolizada y entrecruzador orgánico en un medio poroso \*

**Autor:** Brayan Farid Aguilar Rubial\*\*

**Palabras clave:** Gel polimérico, Poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM), Polietilenimina (PEI), Reología, Pruebas de desplazamiento, Viscosidad, Tasa de cizallamiento.

#### Descripción:

La inyección de geles poliméricos constituye uno de los métodos más efectivos para el control de la producción de agua en un yacimiento. Considerando la complejidad del medio poroso y la importancia del comportamiento reológico de estas soluciones, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la respuesta reológica de estos sistemas en el medio poroso. En primer lugar, a partir de una matriz experimental robusta se seleccionó la formulación gelificante con el comportamiento más favorable bajo las condiciones del campo de estudio. Esta formulación estuvo compuesta por polímeros de Poliacrilamida parcialmente hidrolizada (5000 ppm de alto peso molecular y 5000 ppm de bajo peso molecular), Polietilenimina como agente entrecruzador orgánico (relación 4:1 respecto al polímero) y Cloruro de Potasio como retardante (relación 1:1 respecto al polímero). Se obtuvo un tiempo de gelificación de 10 horas y un código F de rigidez en la escala de Sydanks después de 24 horas.

Posteriormente, el comportamiento reológico de la formulación gelificante y su solución polimérica constituyente se evaluó mediante reología rotacional utilizando una geometría cono – plato, evidenciando en ambos casos un comportamiento reofluidizante. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas de desplazamiento para evaluar la respuesta de las formulaciones en el medio poroso, donde se aplicó el modelo de Canella et al. (1988) para estimar la tasa de cizallamiento aparente en función de la reología de los fluidos, la tasa de inyección, las propiedades petrofísicas del medio y un factor de ajuste (C) que correlaciona los datos obtenidos en el reómetro con los del medio poroso.

Los resultados obtenidos del factor C fueron para la solución polimérica 3.9 y el gel 0.3, lo que evidencian una diferencia en su comportamiento de flujo dentro del medio poroso. En la solución polimérica, un valor de C elevado, indica mayor facilidad de flujo, atribuida a la orientación de las cadenas en la dirección del flujo. Y en consecuencia una viscosidad estable (37.09 mPa\*s). Por el contrario, la estructura del gel es más rígida y su capacidad de bloqueo, indican un valor de C inferior, refleja mayor resistencia de flujo, con incrementos de viscosidad hasta 128.9 mPa\*s con el aumento de la tasa de cizallamiento.

---

\* Tesis de pregrado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: María Isabel Sandoval Martínez. MSc. en Ingeniería de Hidrocarburos. Codirectores: Juan Diego Ceballos Payares. MSc. en Ingeniería de Hidrocarburos. Sonia Alejandra Quintero Antolínez. Geóloga

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Abstract**

**Title:** Prediction of the rheological behavior of a polymeric gel based on partially hydrolyzed polyacrylamide and organic crosslinker in a porous medium\*

**Author:** Brayan Farid Aguilar Rubial\*\*

**Keywords:** Polymeric gel, Partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM), Polyethyleneimine (PEI), Rheology, Coreflooding test, Viscosity, Shear rate.

**Description:**

The injection of polymer gels is one of the most effective methods for controlling water production in a reservoir. Considering the complexity of the porous medium and the relevance of the rheological behavior of these solutions, the aim of this research was to evaluate the rheological response of these systems in the porous medium. First of all, based on a robust experimental matrix, the gelling formulation with the most favorable behavior under the conditions of the study field was selected. This formulation consisted of a mixture of Partially hydrolyzed polyacrylamide polymers (5000 ppm high molecular weight and 5000 ppm low molecular weight), Polyethyleneimine as an organic crosslinking agent (4:1 ratio to the polymer), and Potassium Chloride as a retarder (1:1 ratio to the polymer). A gelation time of 10 hours and a Sydanks F-code stiffness were obtained after 24 hours.

Furthermore, the rheological behavior of the gelling formulation and its constituent polymeric solution was evaluated by rotational rheology using a cone-plate geometry, showing rheofluidizing behavior in both cases. Finally, displacement tests were carried out to evaluate the response of the formulations in the porous medium, where the model of Canella et al. (1988) model was applied to estimate the apparent shear rate as a function of fluid rheology, injection rate, petrophysical properties of the medium, and an adjustment factor that correlates the data obtained in the rheometer with those of the porous medium.

The results obtained for factor C were 3.9 for the polymer solution and 0.3 for the gelling solution, which shows a difference in their flow behavior within the porous medium. In the polymer solution, a high C value indicates greater flowability, attributed to the orientation of the chains in the direction of flow. This results in stable viscosity (37.09 mPa\*s). In contrast, the gel structure is more rigid and its blocking capacity indicates a lower C value, which reflects greater flow resistance, with viscosity increases of up to 128.9 mPa\*s with the increase in the shear rate.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physicochemistry. School of Petroleum Engineering. Director: MSc. María Isabel Sandoval Martínez. Codirector: MSc. Juan Diego Ceballos Payares. Geologist. Sonia Alejandra Quintero Antolínez

### Introducción

El exceso de producción de agua causado por la presencia de acuíferos activos genera un aumento de los costos de operación y manejo, alta producción de arena y pérdida de productividad del pozo (Al Brahim et al., 2022). Como solución, se han implementado tratamientos químicos de *Water Shut-off*, los cuales consisten en la inyección de soluciones poliméricas con algún agente entrecruzador orgánico o inorgánico, con el objetivo de formar geles rígidos en determinadas zonas del yacimiento y, con esto, bloquear el flujo excesivo de agua hacia el pozo productor, dando como resultado una reducción en el corte de agua (Thomas et al., 2000).

Para la preparación de geles, el polímero más utilizado es la Poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM). Por su parte, los geles poliméricos formulados con entrecruzadores inorgánicos presentan limitaciones en formaciones con temperaturas entre los 60 y 80°C, ya que incide en tiempos de gelificación cortos. Por tal razón, entrecruzadores como el fenol/formaldehído o polietilenimina, se utilizan ampliamente en yacimientos de alta temperatura (superior a 80 °C) por la mayor estabilidad térmica de los enlaces que se forman entre el polímero y el entrecruzador (Al-Muntasheri et al., 2007; Ghriga et al., 2020; Zhu et al., 2017).

Asimismo, el proceso de selección de formulaciones de geles poliméricos tiene como objetivo garantizar el tiempo de gelificación, el grado de rigidez y la estabilidad de estos, bajo el estudio de parámetros como la concentración de polímero, concentración de agente entrecruzador, presencia de aditivos como retardantes y temperatura. Del mismo modo,

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

comprender la reología de los geles poliméricos en medios porosos es de gran importancia, ya que las soluciones llegan a comportarse de manera diferente cuando fluyen a través de la red poral, debido a la aceleración y desaceleración del fluido al entrar y salir de los poros individuales. A su vez, en el laboratorio, uno de los instrumentos más útiles al momento de evaluar el desempeño de los geles poliméricos es el reómetro, el cual permite caracterizar las propiedades reológicas de un material mediante la medición de parámetros como viscosidad, esfuerzo y tasa de cizalla.

Dicho lo anterior, a través de esta investigación, se tiene como objetivo la predicción del comportamiento reológico de un gel polimérico basado en poliacrilamida parcialmente hidrolizada y entrecruzador orgánico en un medio poroso. Para ello, el presente documento consta de cuatro capítulos: el primero, contiene las generalidades de la investigación, donde se presenta el planteamiento del problema, antecedentes, y los objetivos. El segundo capítulo expone el marco teórico, donde se profundiza en las generalidades de un sistema de gel polimérico, factores que afecta la cinética de reacción, medición del tiempo de gelificación y la evaluación reológica. El tercer capítulo aborda la metodología empleada para el desarrollo de los objetivos propuestos, clasificado en tres fases, donde la primera fase consiste en la preparación de la solución polimérica y el gel, monitoreos aplicando el código de Sydanks y mediciones del comportamiento reológico de las muestras en el reómetro. La segunda fase, detalla la preparación y ensamble del medio poroso, determinación de las propiedades petrofísicas del mismo y finalmente la inyección de los fluidos en estudio. Por último, la tercera fase, consiste en el ajuste de los datos obtenidos tanto en el reómetro como en las pruebas de desplazamiento mediante el modelo semi empírico seleccionado de la literatura.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Finalmente, el cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos en cada fase, con el objetivo de establecer la predicción del comportamiento reológico de un gel polimérico basado en poliacrilamida parcialmente hidrolizada y entrecruzador orgánico en un medio poroso.

### **1. Generalidades de la investigación**

#### **1.1. Planteamiento del problema**

La inyección de geles poliméricos se ha destacado como un tratamiento eficaz de Water Shut-off debido a su capacidad de restringir y/o bloquear el flujo de agua en formaciones muy permeables o fracturadas. Estos fluidos presentan un comportamiento reofluidizante difícil de entender en el medio poroso, ya que en estos sistemas la tasa de cizallamiento varía considerablemente debido a diferentes factores como condiciones de flujo, geometría de poros, degradación mecánica y tortuosidad del medio (Chauveteau, 1982; Skauge et al., 2018). Sumado a esto, generalmente las evaluaciones reológicas a nivel de laboratorio se aplican directamente sobre las muestras mediante instrumentos como reómetros o viscosímetros, sin tener en cuenta la interacción con el medio poroso y los efectos implicados.

El reómetro es un dispositivo que está equipado con diferentes geometrías que logran obtener mediciones de una propiedad reológica de un fluido, como, por ejemplo, la viscosidad en función de la velocidad de cizallamiento. Sin embargo, estas mediciones suelen limitarse a altas velocidades de cizalla, ya que pueden ocasionar turbulencias o fugas de la sustancia, lo que hace que el comportamiento reológico sea más difuso, los datos más variables y haya mayor incertidumbre en la interpretación de los resultados (Anton Paar, 2016; Davies & Stokes, 2008; Eley, 2012).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

En ese sentido, tomando la premisa de que naturalmente se busca desarrollar modelos reológicos que predigan el comportamiento real de la viscosidad del fluido en función tanto de sus propiedades reológicas como las propiedades del medio poroso. Teniendo en cuenta que el sistema de interés es un medio poroso y que las mediciones originales parten de las obtenidas en un reómetro, se han propuesto diferentes modelos empíricos que correlacionan estas mediciones a partir de la ley de Darcy y convirtiendo las tasas de flujo en el medio poroso en velocidades de cizallamiento. La mayoría de estos modelos se desarrollaron mediante soluciones cuyo principio se basa en haces capilares homogéneos simplificando la geometría compleja de los medios porosos (Airiau & Bottaro, 2020; Berg & van Wunnik, 2017; Eberhard et al., 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea mediante la presente investigación la predicción del comportamiento reológico de un gel polimérico basado en poliacrilamida parcialmente hidrolizada y un entrecruzador orgánico en un medio poroso, esto con el objetivo de ampliar el rango experimental de la velocidad de cizallamiento aceptable en el reómetro, completando su compartimiento en el medio poroso en valores superiores a través de pruebas de desplazamiento.

### **1.2. Antecedentes de la investigación**

La inyección de geles poliméricos ha sido ampliamente estudiada como una técnica de *conformance*, utilizada tanto para mejorar el control de movilidad y la eficiencia del barrido en procesos de recobro mejorado, como para aplicaciones específicas de *water shutoff*, orientadas a reducir la producción excesiva de agua. Los geles formados con poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM) y entrecruzados con agentes orgánicos han sido estudiados por su capacidad de ofrecer un mejor control en la cinética de gelificación, adaptabilidad a las condiciones del yacimiento y un menor impacto con el medio ambiente. Comprender cómo varía la viscosidad y el comportamiento del fluido bajo condiciones como la temperatura, la salinidad y la velocidad de

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

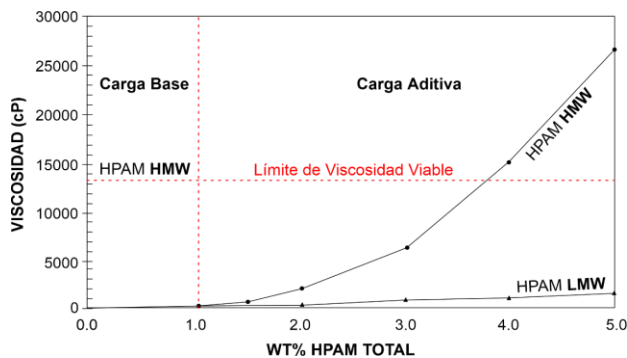
cizallamiento permiten estimar con mayor precisión el tiempo de inyección y la profundidad a la que se puede colocar eficazmente la solución dentro de la formación.

Southwell y Sydansk (2000) realizaron un estudio para mejorar la eficiencia de los tratamientos de gelificación con el fin de reducir la permeabilidad y controlar la movilidad de fluidos. En su investigación, propusieron una formulación de geles poliméricos que mezcla polímeros de alto (según sus siglas en inglés, high molecular weight, HMW) y bajo peso molecular (según sus siglas en inglés, low molecular weight, LMW). Los polímeros de alto peso molecular aportan cadenas de gran tamaño que incrementan la viscosidad a la solución, además de proporcionar estabilidad, resistencia y mejorar el rendimiento del gel resultante. Por otro lado, los polímeros de bajo peso molecular, generan viscosidades más bajas, pero requieren mayor cantidad de moléculas para alcanzar la misma concentración, lo cual se traduce en mayores costos en la preparación. La concentración de polímeros de alto peso molecular varía entre 6000 y 25000 ppm, mientras que la de polímeros de bajo peso molecular se sitúa entre 6000 y 100000 ppm. Por otro lado, según la Figura 1, se demostró que, al aumentar la concentración de polímeros de alto peso molecular, la viscosidad de la solución de gelante también aumenta, pero esto puede llevar a incrementos excesivos en la viscosidad lo que dificultaría el proceso de inyección. No obstante, la adición de polímeros de bajo peso molecular no representa cambios significativos en el comportamiento de la viscosidad, pero sí contribuye a que la solución mantenga una viscosidad adecuada para su manejo y colocación sin exceder los límites de viscosidad permitidos operacionalmente. Además de proporcionar mayor cantidad de sitios disponibles, para posteriores entrecruzamientos, mejorando la red tridimensional del gel.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### Figura 1

*Adición incremental del polímero LMW a la carga base de polímero HMW*



*Nota.* Tomado de Southwell & Sydansk, 2000

Jia et al (2012) investigaron el rendimiento de la gelificación del sistema HPAM/PEI. Los resultados demostraron tiempos de gelificación más prolongados que el sistema convencional del HPAM con acetato de cromo (III), con valores entre 18 y 72 horas a 65°C. Este rango de tiempo varía según la concentración de polímero, entrecruzador y la salinidad de la formación. Así mismo, Wang et al (2024) concluyeron que el tiempo de gelificación de un sistema HPAM/PEI en un rango de concentración de polímero entre 4000 y 20000 ppm, puede variar entre una hora y 23 días, siendo posible formar geles de alta resistencia (alcanzando un grado H, según la escala de Sydanks). Además, observaron que, al aumentar la temperatura, el tiempo de gelificación disminuye y la resistencia del gel aumenta. Por último, se evidencia que la presencia de sales a altas concentraciones, especialmente aquellas con cationes divalentes, dificultan la gelificación del sistema.

No obstante, a altas temperaturas, los geles poliméricos pueden presentar una resistencia insuficiente o tiempos de gelificación demasiado cortos, lo que podría causar la gelificación dentro

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

de la tubería de inyección y graves problemas operativos. Para ello, Amir et., al (2022) y Yi et al. (2017) implementaron el uso de sales ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NaCl}$ ) como retardadores para prolongar el tiempo de gelificación para este tipo de sistemas gelantes. Sin embargo, influyó de manera negativa en la resistencia del gel.

Por otro lado, entender el flujo en medios porosos, es un gran desafío, ya que los polímeros y los geles experimentan una compleja interacción entre sus propiedades (peso molecular, grado de hidrólisis, grado de entrecruzamiento, etc) y las características del medio (porosidad, permeabilidad, tortuosidad, etc). Stavland et al. (2010) investigaron el comportamiento de soluciones de HPAM en función de su velocidad de inyección a través de medios porosos. Los resultados evidenciaron cuatro regímenes de viscosidad: la región I se caracterizó a bajas tasas de cizallamiento, donde la viscosidad aparente es menor a la viscosidad medida en el laboratorio debido al volumen poroso inaccesible. En la región II se evidencia un comportamiento pseudoplástico controlado por el tiempo de relación del polímero. En la región III se presentan altas tasas de cizallamiento y se identifica un aumento de la viscosidad aparente, atribuido a la elongación molecular del polímero. Y finalmente, la región IV, donde a tasas de cizalla muy elevadas, la viscosidad disminuye drásticamente como consecuencia de la degradación mecánica del polímero.

Por su parte, el estudio de comparar el flujo en medios porosos con los datos del viscosímetro/ reómetro se realiza mediante el cálculo de la viscosidad aparente a partir de la ley de Darcy y convirtiendo los caudales en tasas de cizallamiento mediante modelos que se derivan del modelo de haz de capilar para el flujo de fluidos no newtonianos. Teeuw y Hesselink (1980) compararon el comportamiento del flujo de soluciones de biopolímeros en núcleos de arenisca de

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Bentheim y un viscosímetro. Determinaron que los exponentes de la ley de potencia (índice de flujo) en el viscosímetro y en medios porosos fueron similares. Sin embargo, se evidencia una disminución de la viscosidad en el medio poroso en comparación con los valores reportados por el equipo. Finalmente, concluyeron que dicha disminución de la viscosidad, se debe a diferencias en las estructuras del medio, distribución del tamaño de los poros y limitantes de los modelos teóricos que subestiman las tasas de cizallamiento aparentes en medios porosos.

Chauvateau (1982) analizó como varía la viscosidad aparente de una solución de Goma Xantana que fluye en medios porosos con distintos tamaños de poros y geometría. Para ello, realizó una caracterización reológica con viscosímetros capilares y un modelo semiempírico para estimar la tasa de cizallamiento promedio en los poros a partir de la velocidad de flujo y propiedades del medio. El factor ajustado experimentalmente fue de 1.7, el cual permite correlacionar los resultados del viscosímetro con el comportamiento en el medio poroso.

Cannella et al. (1988) compararon soluciones de Goma Xantana tanto en viscosímetros como en el medio poroso, en un amplio rango de concentraciones de polímero (300-1600 ppm) y medios porosos de areniscas y carbonatos con permeabilidades entre 400 a 800 mD. Para ello, desarrollaron un modelo empírico que permitió correlacionar ambas viscosidades por medio del ajuste de un factor de ajuste empírico (C), que abarca el efecto de la geometría de los poros y la tortuosidad del medio. Dados los resultados obtenidos, el mejor ajuste se logró con un C de 6.

Skauge et al. (2016) compararon la viscosidad de una solución polimérica de alto peso molecular con una concentración de 2000 ppm, medida en el reómetro utilizando una geometría cono – plato con la viscosidad efectiva durante una prueba de desplazamiento. Para realizar esta comparación, estimaron la tasa de cizallamiento dentro del medio poroso a través de la ecuación

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

empírica de Chauveteau (1981), la cual es función de la velocidad Darcy, porosidad y permeabilidad del medio poroso y un factor empírico que está relacionado con la geometría y la tortuosidad del poro. Seguidamente, ajustaron directamente al modelo de la ley de potencia, utilizando un factor empírico de 130.

### **1.3. Objetivos.**

#### **1.3.1. *Objetivo General***

Predecir el comportamiento reológico de un gel polimérico basado en poliacrilamida parcialmente hidrolizada y entrecruzador orgánico en un medio poroso.

#### **1.3.2. *Objetivos Específicos***

Evaluar el comportamiento reológico de diferentes formulaciones de geles poliméricos a través de pruebas de botella y reología rotacional para la obtención de los reogramas de viscosidad en función de la velocidad de cizallamiento a temperatura de yacimiento.

Determinar el comportamiento reológico de una solución polimérica con y sin entrecruzador en el medio poroso a condiciones de yacimiento mediante pruebas de desplazamiento para la obtención de los respectivos reogramas de viscosidad en función de la tasa de inyección.

Establecer por medio de un modelo empírico el comportamiento de viscosidad en función de la velocidad de cizallamiento a condiciones del medio poroso correlacionado los datos obtenidos en el reómetro y pruebas de desplazamiento.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### 2. Marco teórico

Los métodos de control de agua, también llamados "*water shut-off*" son soluciones diseñadas para gestionar la producción excesiva de agua, minimizar la pérdida de productividad y reducir los costos operativos asociados con equipos y tratamientos de separación en superficie. Existen diferentes tratamientos para el control de agua los cuales pueden ser químicos y mecánicos (Alkadem et al., 2024; Juárez et al., 2020). Sin embargo, se profundizará en el tratamiento químico con geles poliméricos, los cuales son aplicados a pozos productores con acuíferos activos para bloquear la entrada excesiva de agua.

#### 2.1 Gel polimérico

Un gel puede definirse como un sistema compuesto por un fluido que actúa como solvente o fase continua, y una fase dispersa formada por un gran número de elementos entrelazados entre sí con la fuerza suficiente para formar una red tridimensional rígida y continua. Esta estructura exhibe un comportamiento similar al de un sólido, ya que mantiene una forma definida y no fluye libremente, pero al mismo tiempo conserva características propias de un líquido, al poder deformarse bajo la acción de determinados esfuerzos o tensiones (Moradi-Araghi, 1999; Sakai, 2020).

En materia de geles poliméricos, varios autores describen a estos sistemas como geles donde el solvente o fase continua es de naturaleza acuosa y la fase dispersa consiste en una red de polímeros entrecruzados que se hinchan en el solvente, dándole así la propiedad de rigidez al sistema.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Generalmente, la formación de un gel polimérico consiste en una transición desde un estado original, donde el polímero se encuentra libre en el solvente formando una solución líquida; hasta un estado gelificado o similar a un sólido, donde se genera una red rígida que restringe el movimiento del sistema. En la mayoría de los casos, esta red es formada a través de una serie de entrecruzamientos entre cada uno de los elementos, los cuales pueden tener naturaleza química o física.

La gelificación de estos sistemas se produce dentro de la formación objetivo y se ve afectada por las condiciones del yacimiento tales como la temperatura, litología, la salinidad del agua de formación y el pH.

Los polímeros comúnmente empleados en la síntesis de geles poliméricos se dividen en dos categorías: polímeros sintéticos y biopolímeros. Entre los polímeros sintéticos más utilizados en procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR) se encuentran los hidrosolubles a base de acrilamida. Un ejemplo típico es la poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM), que es un copolímero compuesto de acrilamida y acrilato. Su desempeño depende de parámetros clave como la viscosidad y las propiedades viscoelásticas, que, a su vez, están directamente relacionados con su peso molecular, concentración, porcentaje promedio de monómeros de acrilato en las cadenas poliméricas y la composición iónica de la solución acuosa (Spildo & Sæ, 2015). Estos polímeros suelen ser económicos y pueden entrecruzarse con agentes orgánicos e inorgánicos para formar geles con buenas características de rigidez y estabilidad.

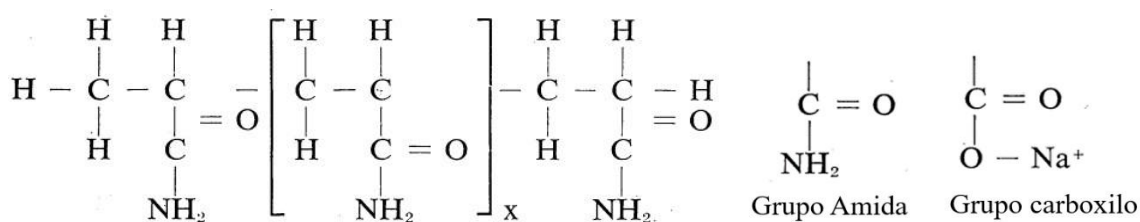
Un polímero está compuesto por unidades básicas, conocidas como monómeros, que se repiten muchas veces. La unidad básica de la poliacrilamida está formada por carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y oxígeno (O), como se muestra en la Figura 2. Ahora bien, este polímero puede modificarse químicamente cambiando algunos grupos amida por grupos

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

carboxilo. Este proceso se denomina hidrólisis y el porcentaje de hidrólisis representa el número de grupos amida que se han transformado en grupos carboxilo (White et al., 1973).

**Figura 2**

*Estructura molecular de un polímero de poliacrilamida.*



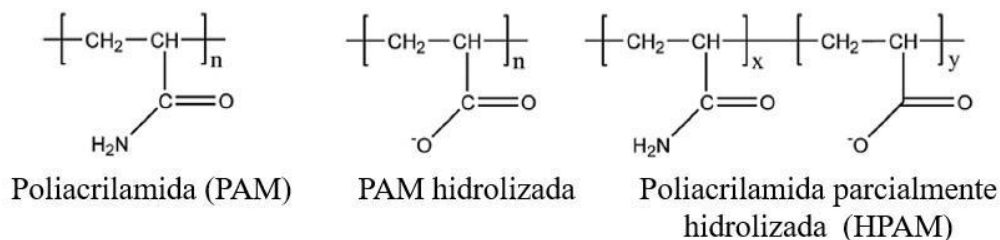
*Nota: Tomado de White et al., (1973)*

La estabilidad térmica de los polímeros limita su aplicación en condiciones de alta temperatura y alta salinidad, ya que, en los yacimientos, los cationes divalentes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Sr}^{2+}$  presentes en las salmueras interactúan con el polímero, induciendo su hidrólisis y causando la inestabilidad de su estructura. Esto se debe a que se incrementan los puntos de reacción para el entrecruzamiento, lo que da lugar a la formación de estructuras internas más compactas. A medida que el polímero se hidroliza térmicamente, se generan grupos carboxilato que se entrecruzan con los cationes divalentes en el agua, precipitando fuera de la solución (Moradi-Araghi, 2000). En la Figura 3 se muestran la poliacrilamida (PAM), poliacrilamida hidrolizada y parcialmente hidrolizada (HPAM) (Ma et al., 2015).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 3**

*Estructura molecular de PAM y HPAM.*



*Nota.* Tomado de Ma et al. (2015)

Por otra parte, los agentes entrecruzadores son sustancias químicas que se conectan con las moléculas de polímeros adyacentes mediante interacciones físicas o químicas para desarrollar una red molecular tridimensional a condiciones de yacimiento (Chelu & Musuc, 2023). Pueden clasificarse en entrecruzadores orgánicos e inorgánicos:

### **2.1.1. Geles con entrecruzadores inorgánicos**

Se basan principalmente en la interacción iónica entre cationes metálicos multivalentes ( $Cr^{+3}$ ,  $Al^{+3}$  y  $Zr^{+4}$ ) y los grupos carboxilato de la poliacrilamida parcialmente hidrolizada. Esta clase de geles poliméricos son estables en yacimientos de bajas temperaturas ( $<50\text{ }^{\circ}C$ ). Cuando aumenta la temperatura de la zona de interés, los geles formados con este tipo de entrecruzadores disminuyen su eficacia considerablemente debido al debilitamiento de los enlaces iónicos ya que poseen una baja estabilidad térmica y una velocidad de reacción muy rápida, lo que conlleva a tiempos de gelificación muy cortos (Zhu et al., 2017).

### **2.1.2. Geles con entrecruzadores orgánicos**

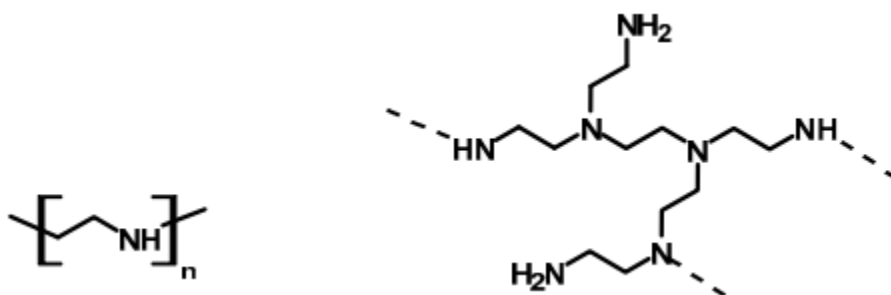
Estos se entrecruzan mediante enlaces covalentes con los grupos funcionales de las estructuras poliméricas. En comparación con los entrecruzadores inorgánicos, estos

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

entrecruzadores tienen un tiempo de gelificación más prolongado, mayor estabilidad térmica y mayor resistencia a la salinidad. Algunos de los entrecruzadores orgánicos más utilizados son glioxal, polietilenimina (PEI), dihidroxinaftaleno, fenilacetato, hidroquinona o la combinación del fenol y el formaldehído (Jia et al., 2012). El PEI es un polímero formado por unidades repetitivas de  $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}-$  en forma lineal o ramificada, tal cual se ve observa en la Figura 4. Puede tener grupos amina primarios, secundarios y terciarios capaces de reaccionar con los grupos carbonilo o amidas del HPAM mediante enlaces covalentes, los cuales son más fuertes y estables a altas temperaturas (Chandra et al., 2025).

### Figura 4

*Estructura de la polietilenimina: lineal – ramificada*



*Nota.* Tomado de Chandra et al., (2025).

Investigaciones previas han demostrado que la viscosidad y la estabilidad térmica de los geles pueden ser influenciadas por factores como la concentración del polímero, el peso molecular y la concentración del agente de entrecruzamiento. Por ejemplo, Jia et al., (2012), evaluaron el rendimiento de gelificación de un sistema basado en poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM) y polietilenimina (PEI) como agente entrecruzador, concluyendo que un aumento en la

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

concentración de polímero y el contenido de sal puede resultar en tiempos de gelificación prolongados, a su vez, una mayor concentración de entrecruzador puede afectar en gran medida a la estabilidad del gel favoreciendo la sinéresis.

Desde otro enfoque, Yu et al., (2022), estudiaron el efecto de las velocidades de cizallamiento en el proceso de gelificación dinámica del gel polimérico en el medio poroso. Los resultados mostraron que el tiempo final de gelificación dinámica es 2.4 veces mayor que el tiempo de gelificación estática en medios porosos. Así mismo, la velocidad de inyección tiene poco impacto en el tiempo de gelificación dinámica, no obstante, sí afecta considerablemente la resistencia del gel. A velocidades más altas, la resistencia del gel disminuye debido al aumento de la tasa de cizallamiento.

### **2.2 Factores que afectan la cinética de gelificación**

Existen algunos parámetros, tales como la temperatura de la formación, el pH inicial, la salinidad de la fase continua, la concentración de polímero, la concentración del entrecruzador y la presencia de aditivos, que influyen en el comportamiento de la viscosidad, el tiempo de gelificación y la resistencia del gel polimérico. Cabe resaltar que el tiempo de gelificación y la fuerza del gel son los indicadores de rendimiento más importantes del gel.

#### ***2.2.1 Efecto de la temperatura***

A medida que la temperatura aumenta acelera el movimiento molecular, lo que termina en aumentar la velocidad de reacción entre el polímero y el entrecruzador, así mismo, aumenta la hidrólisis de los grupos amida disponibles dando lugar a más espacios de entrecruzamiento, lo que lleva a una formación más rápida de gel (Sengupta et al., 2012).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### 2.2.2 *Efecto del pH inicial*

El pH juega un papel crítico porque afecta tanto el grado de hidrólisis del HPAM como la interacción entre el polímero y el entrecruzador. El-Karsani et al. (2015) evaluaron la estabilidad y el tiempo de gelificación en tres sistemas gelificantes con diferente pH: 10.2 (medio alcalino), 7 (medio neutro) y 3 (medio ácido). Los resultados indicaron que, en el medio ácido y alcalino, el gel alcanzó mejor estabilidad, pero menores tiempos de gelificación, en comparación con el medio neutro. Así mismo, Yi et al., (2017) concluyeron que en un sistema de gel PAM/PEI en medios alcalinos (pH=9), el proceso de gelificación finalizó en 15 minutos, mientras que en condiciones neutras requirió aproximadamente 30 minutos para alcanzar el equilibrio. En general, observaron que, a mayor valor de pH, más rápido es el proceso de gelificación. Sin embargo, en condiciones ácidas (pH=4) no se pudo formar gel.

Estos fenómenos están asociados al grado de hidrólisis del polímero, ya que, en medios alcalinos, la hidrólisis se acelera debido a la alta concentración de iones hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ), que favorecen la reacción de conversión de los grupos amida en carboxilato. A medida que aumenta el grado de hidrólisis, el HPAM/PAM adquiere más carga negativa, lo que incrementa la repulsión entre cadenas poliméricas y por consiguiente procesos de gelificación cortos. Esto puede afectar la viscosidad inicial del polímero y su capacidad de formar un gel estable en el tiempo.

Caso contrario ocurre en medios ácidos, en donde el proceso de hidrólisis es más lento o incluso inhibido. Esto ocurre debido a la abundancia de iones  $\text{H}^+$  que dificultan la conversión de los grupos amida a carboxilato. Además, los depósitos de entrecruzamiento disponibles disminuyen y conducen a la formación de las redes tridimensionales menos eficientes y estables (Amir et al., 2019; Yi et al., 2017).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### 2.2.3 *Efecto de la salinidad*

Las sales son utilizadas como agentes retardadores para prolongar el tiempo de gelificación y garantizar la colocación del tratamiento en la zona de interés. Sin embargo, su incorporación puede influir negativamente en la resistencia del gel. Yi et al (2017) en su estudio, añadieron diferentes sales (cloruro de sodio (NaCl), cloruro de amonio (NH<sub>4</sub>Cl), acetato de sodio (CH<sub>3</sub>COONa) y citrato de sodio (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>Na<sub>3</sub>O<sub>7</sub>)) para determinar su influencia en el proceso de gelificación de un sistema de PAM/PEI. Los resultados mostraron que todas las sales incrementaron el tiempo de gelificación respecto a la solución inicial que no contenía sal (27.5 minutos). Por ejemplo, el tiempo de gelificación en presencia de NaCl fue de 34 minutos, mientras que con NH<sub>4</sub>Cl alcanzó 96 minutos. Este comportamiento se atribuye al ion amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), cuyo apantallamiento con las cargas negativas del PAM es más fuerte que el del ion sodio (Na<sup>+</sup>), lo que retrasa significativamente el entrecruzamiento, pero reduce la viscosidad final y debilita la consistencia del gel. Por el contrario, la adición de CH<sub>3</sub>COONa y C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>Na<sub>3</sub>O<sub>7</sub> provocaron un aumento de la viscosidad, lo que indica que estas sales no solo retardaron el tiempo de gelación, sino también favorecieron la formación de un gel más rígido y estable. Esto se debe a que los iones acetato y citrato pueden coordinarse temporalmente con los grupos amina del PEI, lo que genera un bloqueo que reduce la disponibilidad de grupos amina para reaccionar inicialmente, pero que, al liberarse gradualmente, las aminas vuelven a incorporarse en la reacción de entrecruzamiento, permitiendo obtener un gel con buenas características de consistencia.

Una de las razones por las cuales se atribuye el aumento del tiempo de gelificación al incremento de la salinidad está relacionada con la contracción que sufren las cadenas poliméricas al estar en ambientes salinos. Esto puede explicarse porque los cationes monovalentes y divalentes presentes en la solución de las soluciones pueden bloquear o neutralizar las cargas negativas

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

disponibles en los grupos carboxilato de los polímeros, lo que se conoce como efecto de apantallamiento y, en consecuencia, las cadenas de polímero pierden su repulsión interna lo cual ocasiona su colapso y, con esto, una disminución del radio hidrodinámico, generando así una estructura enrollada. Bajo este enfoque, la forma enrollada que adquieren las moléculas del polímero no permite que estén completamente estiradas y, por lo tanto, disminuye el número de entrecruzamientos posibles que se desarrollarían durante la formación del gel. Asimismo, un menor número de espacios disponibles para los entrecruzamientos implicaría un aumento en el tiempo de gelificación y una menor estabilidad/elasticidad (G. Al-Muntasheri & Nasr-El-Din, 2008; Amir et al., 2019; El Karsani et al., 2014a).

Por otro lado, la salinidad también afecta el grado de hidrólisis que puede alcanzar un polímero durante la formación del gel, dando como resultado la prolongación de la etapa donde inicia la gelificación. El proceso de hidrólisis se desarrolla a medida que pasa el tiempo, donde los grupos funcionales de carga negativa se unen a los iones positivos (cationes) provenientes de las sales, generando así enlaces iónicos débiles, de esta manera, la adición de sal protege u ocupa los espacios disponibles para los entrecruzamientos y, por lo tanto, retarda el proceso de gelificación (Amir, Said y Jan, 2018).

### ***2.2.4 Efecto de la concentración del polímero***

Un aumento en la concentración del polímero implica un mayor número de sitios disponibles para las reacciones de entrecruzamiento y, por consiguiente, una mayor estabilidad y tiempos de gelificación más cortos. También, al aumentar la concentración de polímero, la viscosidad inicial de la solución base también incrementa, lo que resulta en desafíos para su inyección y colocación en yacimientos profundos, además del elevado costo asociado a su aplicación. Caso contrario ocurre a bajas concentraciones, donde se produce un gel menos denso

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

o incluso podría no formarse un gel completo, ya que no hay suficiente polímero para establecer una red adecuada (G. Al-Muntasheri & Nasr-El-Din, 2008; Amir et al., 2019).

Wang et al., (2024) evaluaron el efecto de la concentración de polímero en un sistema HPAM/PEI variando la concentración de polímero en un rango de 4000 ppm a 20000 ppm y una concentración fija de entrecruzador de 2000 ppm. Se determinó que la viscosidad del sistema a concentraciones de HPAM superiores a 12000 ppm era superior a 100 mPa-s, mientras que la viscosidad inicial de la mayoría de los sistemas de gel utilizados es aproximadamente 20~60 mPa-s.

### ***2.2.5 Efecto de la concentración del entrecruzador***

El efecto de la concentración de entrecruzador también se ha evaluado en diferentes estudios, concluyendo de forma general que, al incrementar la concentración de entrecruzador el tiempo de gelificación disminuye, pero la resistencia del gel aumenta. Yi et al., (2017) estudiaron la influencia del PEI en el proceso de gelificación, para ello, prepararon tres soluciones gelificantes con concentraciones de PEI de 1500, 3000 y 5000 ppm y con la misma concentración de PAM (7000 ppm). Cuando la concentración de PEI aumentó de 1500 a 5000 ppm, el tiempo de gelificación disminuyó de 29.5 a 20 minutos. Esta observación se debe al hecho que ofrece más puntos de entrecruzamiento que conectan las cadenas de polímero, lo que limita el movimiento molecular y, en consecuencia, se crean geles con mayor rigidez. Sin embargo, Vargas-Vasquez et al., (2009) explicaron que un exceso en la concentración de PEI, favorece la compresión de las moléculas de agua contenidas en la estructura y a su vez, contraen su volumen para expulsar dichas moléculas, fenómeno conocido como sinéresis.

## **2.3 Medición del tiempo de gelificación**

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

El tiempo de gelificación, la fuerza del gel y la estabilidad del gel se consideran propiedades fundamentales o indicadores clave del rendimiento de los sistemas de geles poliméricos. Su importancia radica en que deben garantizar que el tiempo de gelificación sea suficientemente largo para ubicar el gel a la profundidad de interés dentro de la formación y, a su vez, mantener su consistencia y rigidez el mayor tiempo posible, ya que su deterioro temprano representaría la pérdida de la capacidad de bloqueo y, por ende, la necesidad de aplicar un nuevo tratamiento que implicaría mayores costos en el proceso.

Yu et al. (2022) establece que el proceso de gelificación abarca tres etapas diferentes:

- **Etapas de inducción:** tiempo inicial del proceso donde la viscosidad se mantiene en sus valores originales o sin cambios significativos, esto debido a que las moléculas de polímero y el entrecruzador interactúan lentamente.
- **Etapas de entrecruzamiento o gelificación:** tiempo donde ocurren las reacciones de entrecruzamiento, dando como resultado un aumento repentino y rápido de la viscosidad.
- **Etapas de fortalecimiento y estabilización:** periodo en el cual finalizan las reacciones de entrecruzamiento y el sistema se limita a fortalecer su rigidez, llegando a valores estables de viscosidad.

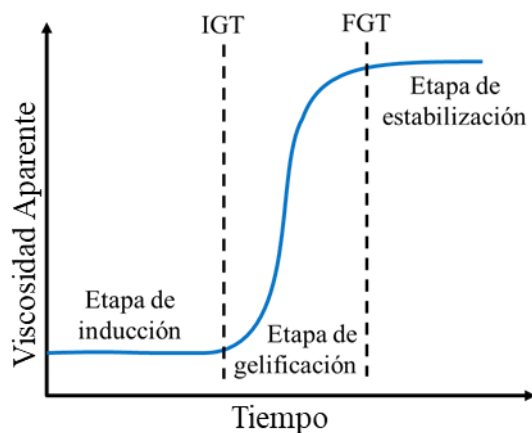
De acuerdo con Mokhtari & Ozbayoglu (2010), el tiempo de gelificación se puede dividir en dos puntos específicos: tiempo inicial de gelificación (IGT, por sus siglas en inglés) y tiempo final de gelificación (FGT, por sus siglas en inglés). El IGT hace referencia al tiempo donde la viscosidad del sistema empieza a aumentar como consecuencia del inicio de las reacciones de entrecruzamiento, marcando el límite entre las etapas de inducción y gelificación. El FGT hace referencia al tiempo en el cual la viscosidad del sistema alcanza un nivel estable al final de las

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

reacciones de entrecruzamiento, definiendo el punto de división entre las etapas de gelificación y estabilización. Un esquema de las diferentes etapas y puntos se muestra en la Figura 5.

**Figura 5**

*Comportamiento de la viscosidad aparente de una solución gelificante en función del tiempo*



*Nota.* Tomado de Mokhtari & Ozbayoglu (2010).

Para determinar las propiedades reológicas de los geles poliméricos, se describen los métodos más comunes entre los que se encuentran los ensayos de botella, reómetro y/o viscosímetros.

El método de ensayo de la botella, definido por Sydansk (1988), es una técnica experimental que proporciona una medición semicuantitativa de la velocidad de gelificación a una temperatura establecida y de la resistencia del gel en función del tiempo. Asimismo, Sydansk estableció un código alfabético para clasificar la resistencia del gel durante el proceso de gelificación, asignando valores que van desde la letra A hasta la I, como se detalla en la Tabla 1 y la Figura 6.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

El método consiste en invertir la botella durante cada periodo de tiempo y la propiedad del gel se registra bajo la influencia de la gravedad. Código A significa que la viscosidad actual es la misma que la viscosidad de la solución gelificante original. Asimismo, el código I indica que no hay deformación en la superficie del gel tras la inversión. Con respecto al tiempo de gelificación, suele considerarse como el período de tiempo en el que las soluciones gelificantes en estado de código A se convierten en gel fluido de código C (Sefti & Koohi, 2007; Sydansk, 1988).

**Tabla 1**

*Códigos de rigidez del gel según el método de la botella.*

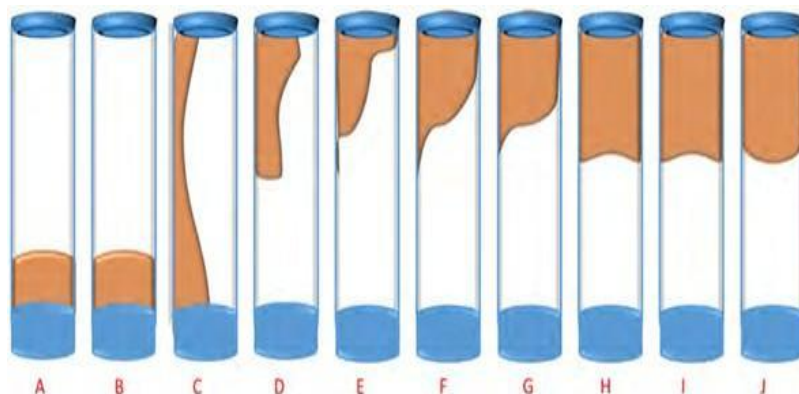
Letra	Descripción
A	No se detecta la formación de gel: El gel parece tener la misma viscosidad que la solución polimérica original
B	Gel muy fluido: el gel parece ser ligeramente más viscoso que la solución polimérica original
C	Gel fluido: la mayor parte del gel visiblemente detectable fluye hacia el tapón del frasco al invertirlo
D	Gel moderadamente fluido: sólo una pequeña parte del gel fluye fácilmente hacia el tapón del frasco al invertirlo
E	Gel poco fluido: el gel apenas puede fluir hasta el tapón del frasco
F	Gel muy deformable que no fluye: el gel no fluye hasta el tapón del frasco al invertirlo
G	Gel no fluido moderadamente deformable: el gel fluye aproximadamente hasta la mitad del frasco al invertirlo
H	Gel no fluido ligeramente deformable: la superficie del gel sólo se deforma ligeramente al invertirlo
I	Gel rígido: la superficie del gel no se deforma en el momento de la inversión
J	Gel rígido sonoro: se percibe una vibración mecánica similar a la de un diapason tras golpear el frasco

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

*Nota.* Tomado de Sefti & Koohi, (2007).

### Figura 6

*Escala visual del método de la botella propuesta por Sydansk*



### 2.4 Evaluación reológica

La reología es la rama de la ciencia que estudia la deformación y comportamiento de flujo de cualquier tipo de material como respuesta a la aplicación de fuerzas aplicadas. Asimismo, es importante conocer dos conceptos fundamentales: esfuerzo de cizalla (shear stress) y tasa de cizalla (shear rate). El primero consiste en la fuerza por unidad de área (presión) que actúa tangencialmente sobre la superficie de un material, lo cual ocasiona que exista una deformación mediante el corte o deslizamiento de una capa del material sobre otra. El segundo corresponde a la velocidad en la que cada una de las capas adyacentes se desplazan unas sobre otras (deformación) como consecuencia del esfuerzo de cizalla aplicado (Ya Malkin et al., 2005).

De igual manera, la viscosidad es un parámetro reológico clave que se define como una medida de la resistencia de un fluido a fluir cuando se le aplica una fuerza o esfuerzo de cizalla (Deshpande et al., 2010). También, es una propiedad cuyo comportamiento es diferente tanto para

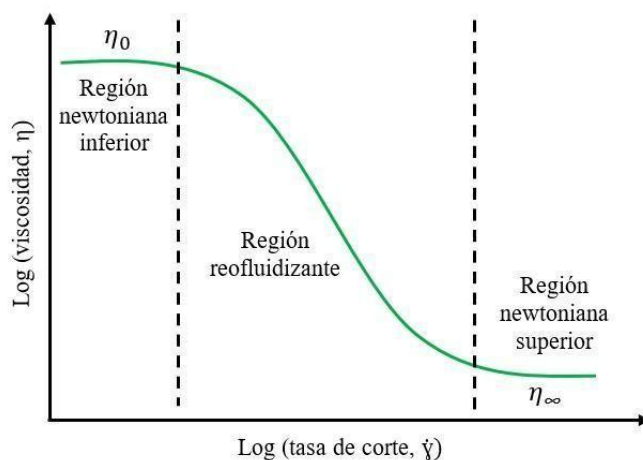
## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

fluidos newtonianos como no newtonianos. Las soluciones poliméricas se caracterizan por ser fluidos no newtonianos, es decir, su viscosidad no es constante y depende de la tensión de cizallamiento aplicada a la solución.

La Figura 7 representa el comportamiento reológico de un fluido no newtoniano de tipo pseudoplástico cuando se mide su viscosidad en función de la velocidad de cizallamiento, el cual se caracteriza por tres regiones: la región newtoniana inferior, donde el fluido a velocidades de cizallamiento muy bajas se comporta como un fluido newtoniano muy viscoso y además aquí, la viscosidad es constante. La región reofluidizante, que se caracteriza por la tendencia de algunos materiales a disminuir su viscosidad cuando se someten a velocidades de cizallamiento de moderadas a altas. Finalmente, a velocidades de cizallamiento superiores a las mostradas en la Figura 7, las soluciones mostrarían un segundo régimen newtoniano.

### Figura 7

*Comportamiento reológico de fluido reofluidizante*



*Nota.* Tomado de Mezger, T. G. (2018)

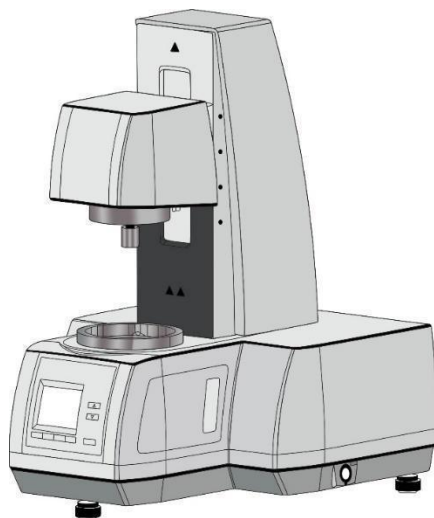
## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### 2.4.1 Reómetro

Uno de los instrumentos utilizados al momento de evaluar el desempeño de los geles poliméricos sometidos a la acción de fuerzas externas, es el reómetro, el cual permite caracterizar las propiedades reológicas de un material mediante la medición de parámetros como esfuerzo y tasa de cizalla. En el caso de reómetros rotacionales, estos permiten, en primer lugar, crear dentro de la muestra el régimen homogéneo de deformación con características cinemáticas y dinámicas estrictamente controladas y, en segundo lugar, mantener el régimen de flujo asignado durante un período de tiempo ilimitado. Una imagen del reómetro puede ser observada en la Figura 8.

#### Figura 8

*Reómetro MCR 302*



*Nota.* Tomado de Anton Paar. (2016). Manual de instrucciones. MCR Series.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### 2.4.1.1 Especificaciones del reómetro MCR 302 de Anton Paar

Uno de los reómetros más complejos y versátiles con los que cuenta la Universidad Industrial de Santander se encuentra en el laboratorio del Grupo de Investigación de Fenómenos Interfaciales, Reología y Simulación de Transporte (FIRST), el cual consiste en un reómetro modular compacto de la serie MCR 302 de la compañía Anton Paar.

Anton Paar (2023) menciona las siguientes especificaciones de su reómetro MCR 302:

- Puede soportar torques en un rango de 0.5 a 230 mN\*m.
- No presenta limitantes en la desviación angular.
- Velocidad angular máxima de 3000 RPM.
- Frecuencia angular máxima de 628 rad/s o 100 Hz.
- Rango de fuerza normal: de -50 a 50 N.
- Manejo térmico activo del motor y rodamientos por largos periodos de tiempo.
- Mayor espacio para la manipulación de muestras e intercambio de accesorios.

Ahora bien, la medición de las propiedades reológicas de un material se puede dar a través de una geometría de flujo, donde es posible los siguientes escenarios: (1) flujo del fluido a través de dos superficies sólidas o un orificio en un cuerpo sólido, (2) flujo del fluido alrededor de un cuerpo sólido y (3) flujo de corriente libre (Ya Malkin et al., 2005).

Por consiguiente, la medición de dichas propiedades del flujo de fluido entre dos superficies sólidas puede realizarse en las siguientes geometrías:

- Flujo del fluido a través de un tubo capilar, cuya sección transversal es generalmente circular.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

- Flujo rotacional donde el fluido se mueve circularmente en el espacio que surge entre las siguientes geometrías: (1) dos cilindros concéntricos rotativos, (2) un cono y un plato, (3) dos superficies cónicas, (4) dos superficies esféricas, entre otros.
- Flujo cortante cuando el fluido se ubica entre dos placas paralelas.
- Compresión o adelgazamiento del fluido mediante el acercamiento de dos placas paralelas.
- Introducción de un cuerpo sólido en el seno del fluido.

**2.4.1.2 Geometrías de medición.** Para realizar estas mediciones, se utilizan diferentes geometrías dependiendo de las características del material y del tipo de prueba. Las principales geometrías utilizadas en los reómetros son:

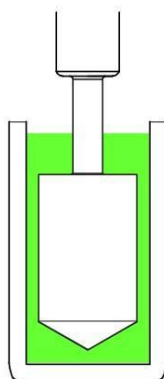
**2.4.1.2.1 *Cilindros concéntricos.*** En esta configuración, la muestra se coloca entre dos cilindros concéntricos: un cilindro externo (vaso) que está fijo y un cilindro interno que gira (ver Figura 9). El fluido se somete a un esfuerzo de cizalla a medida que el cilindro interno gira. Esta geometría es ideal para medir viscosidad de líquidos de baja a media viscosidad.

El volumen de muestra necesario para este sistema se determina mediante una marca ubicada en el interior del cilindro externo, lo que garantiza que se utilice la cantidad adecuada de fluido. Esto asegura que las mediciones sean precisas, ya que el cilindro interno debe estar completamente sumergido en la muestra para que el sistema funcione correctamente.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 9**

*Geometría de medición – cilindros concéntricos.*



*Nota.* Tomado de Anton Paar. (2016). Manual de instrucciones. MCR Series.

Este tipo de geometría presenta las siguientes ventajas: la muestra no se seca, es decir, mínimos efectos de evaporación; se tendrá la temperatura establecida en toda la geometría y no habrá fugas del material en el espacio entre superficies a altas velocidades de cizallamiento. Con respecto a las desventajas, se tienen que: requiere un volumen de muestra alto; es difícil de limpiar; puede haber entrapamiento de burbujas de aire en muestras pastosas; presencia de turbulencia en tasas de cizallamiento altas y equilibrio de la temperatura lento (Anton Paar, 2016).

Por otro lado, este tipo de geometría se puede combinar con elementos rotacionales tales como los husillos en forma de disco o pines y hélices helicoidal. Estas configuraciones permiten mezclar y homogeneizar la muestra, y a su vez, minimiza problemas operativos comunes como el deslizamiento de pared, la sedimentación de partículas y la extracción de muestras. Estos fenómenos afectan la estabilidad de la muestra y pueden incurrir en la subestimación de la viscosidad (Giancontieri et al., 2024; Robinson & Cleary, 2012; Sairam et al., 2012).

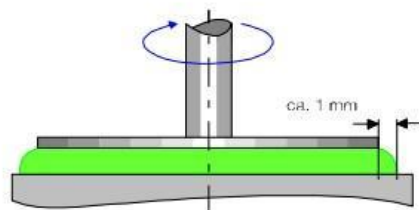
## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**2.4.1.2.2 Platos paralelos.** Esta geometría se basa en un arreglo que consiste en dos superficies planas ubicadas de forma paralela, de tal forma que sus planos son equidistantes en todos sus puntos y en las que la placa inferior está fija y la superior es móvil.

El llenado correcto para este tipo de geometría se presenta en la Figura 10, donde la muestra debe estar apenas por fuera del borde del sistema de medición. Lo más recomendable es remover el exceso de muestra justo por encima de la posición de medición (posición de recorte) para luego mover el sistema de medición a su respectiva posición final. Una falta o exceso de muestra podría ocasionar errores significativos en la medición.

### Figura 10

*Geometría de medición – platos paralelos.*



*Nota.* Tomado de Anton Paar. (2016). Manual de instrucciones. MCR Series.

Esta geometría presenta las siguientes ventajas: buen desempeño en muestras con alta viscosidad; alto rango de tasas de cizallamiento; requiere un volumen de muestra pequeño; facilidad en el llenado y la limpieza; equilibrio de temperatura rápido y la dimensión del espacio entre platos es ajustable (Anton Paar, 2016). No obstante, este sistema conlleva una serie de desventajas, tales como: fuga de la muestra a altas tasas de cizallamiento en el espacio existente

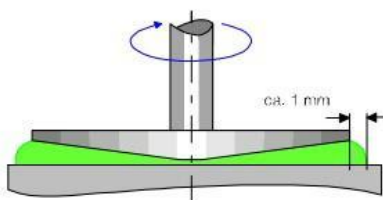
## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

entre los platos, diferentes tasas de cizallamiento a lo largo del espacio entre platos y secado de la muestra.

**2.4.1.2.3 Cono – plato.** En esta configuración se cuenta con un elemento con forma de plato y otro con forma de cono, tal como lo muestra la Figura 11.

### Figura 11

*Geometría de medición – plato-cono.*



*Nota.* Tomado de Anton Paar. (2016). Manual de instrucciones. MCR Series.

Como se puede observar, la ubicación del material sigue las mismas indicaciones mencionadas en la configuración de platos paralelos, donde la muestra se coloca entre los elementos y se asegura que esté apenas por fuera del borde del sistema de medición para asegurarse que el hueco está completamente lleno y no incurrir en errores de medición.

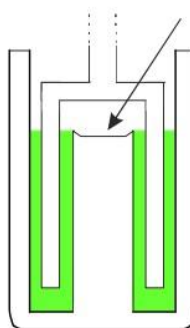
En relación a las ventajas de la geometría, se tienen las siguientes: tasa de cizallamiento constante a lo largo del espacio entre los elementos debido a la forma de cono, requiere de un bajo volumen de muestra, facilidad en el llenado y limpieza y rápido equilibrio térmico. Dentro de las desventajas se encuentran: fugas de la muestra a altas tasas de cizallamiento en el espacio existente entre el plato y el cono; si la muestra presenta partículas, estas pueden obstaculizar la medición y se puede dar el secado de la muestra (Anton Paar, 2016).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**2.4.1.2.4 Doble gap.** En esta geometría se tiene un sistema donde existen dos espacios en el dispositivo de medición, más específicamente, dos cilindros concéntricos con un espacio anular entre ellos, tal como se puede observar la Figura 12.

### Figura 12

*Geometría de medición – doble hueco.*



*Nota.* Tomado de Anton Paar. (2016). Manual de instrucciones. MCR Series.

En este tipo de geometría se debe poner una cantidad pequeña de muestra en los espacios anulares. Posteriormente, se baja el cilindro de medición hacia su respectiva posición final. Bajo estas condiciones, la muestra debería fluir muy poco. Finalmente, se retira el exceso de muestra que quede en la parte superior del cilindro más céntrico con una jeringa (donde indica la flecha en la Figura 12).

Las ventajas que presenta este tipo de esquema implican un buen desempeño en muestras de baja viscosidad, una distribución de temperatura adecuada en todo el sistema y la presencia de huecos pequeños. En contraste, las desventajas radican en el posible secado de la muestra, el

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

equilibrio térmico es muy lento de alcanzar, es sumamente difícil de limpiar y puede haber turbulencia a altas tasas de corte (Anton Paar, 2016).

### 2.5 Modelos reológicos

Para medir las propiedades reológicas, es necesario encontrar los valores numéricos de las constantes que se incluyen en las ecuaciones de los distintos modelos reológicos que permiten representar el comportamiento del fluido en estudio. Dependiendo de la elección de la ecuación, se llevan a cabo experimentos para establecer la influencia de estas constantes en los resultados. Sin embargo, independientemente de la elección de un modelo de comportamiento reológico, la medición del fluido está relacionada a determinar la viscosidad en función de la velocidad de cizallamiento y las propiedades viscoelásticas, como los módulos dinámicos, en función de la frecuencia (Ya Malkin et al., 2005).

#### 2.5.1 Modelo de la ley de potencia

Los fluidos newtonianos se definen como aquellos fluidos que presentan una proporcionalidad directa entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) en flujo laminar, de acuerdo con la ley de viscosidad de Newton:

$$\tau = K * \dot{\gamma} \quad (1)$$

donde la viscosidad ( $\mu$ ) es independiente de la velocidad de deformación, aunque puede verse afectada por otros parámetros físicos, como la temperatura y la presión.

El modelo más utilizado para describir las propiedades reológicas de los fluidos no newtonianos, es la ecuación empírica de ley de potencia (Ostwald, W. 1925) que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de cizallamiento.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

$$\tau = K * \gamma^n \quad (1)$$

En donde K representa el índice de consistencia y n es el índice de comportamiento de flujo, el cual indica el grado de desviación respecto al comportamiento del fluido Newtoniano. Tanto K como n son parámetros de ajuste que dependen de la naturaleza del fluido y de las condiciones de medición. Si n es igual a 1 entonces el fluido se comporta como un fluido newtoniano, si es  $n < 1$  representa un fluido pseudoplástico, mientras que si es  $n > 1$ , se comporta como un fluido dilatante.

A partir de esta expresión, la viscosidad aparente del fluido puede obtenerse dividiendo el esfuerzo de corte y la tasa de cizallamiento, según la ecuación (3), la cual expresa la viscosidad en función de la tasa de cizallamiento. Este modelo es válido únicamente para la región reofluidizante, es decir, para fluidos cuyo índice de flujo se encuentra entre 0 y 1.

$$\mu(\gamma) = K * \gamma^{n-1} \quad (2)$$

Por otra parte, todos aquellos fluidos en donde no se cumple con la proporcionalidad entre el esfuerzo y la velocidad de cizallamiento debido a la no linealidad o al límite elástico inicial, se dice que son fluidos no newtonianos. La reología de los polímeros ha sido ampliamente estudiada con el fin de comprender su comportamiento no newtoniano bajo diferentes condiciones de flujo. Para describir este comportamiento, se han desarrollado y modificado varios modelos reológicos que permiten explicar fenómenos como la fluidificación por cizallamiento, el espesamiento por cizallamiento y el comportamiento viscoelástico, lo que proporciona una idea del comportamiento general del polímero bajo la velocidad de cizallamiento variable. A continuación, se explican diferentes modelos reológicos.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### 2.5.2 *Modelo de Carreau*

Desarrollado por Carreau et al. (1968), representa un punto de referencia para polímeros que presentan comportamiento pseudoplástico a velocidades de cizallamiento bajas, intermedias y altas. La viscosidad en función de la tasa de cizallamiento se expresa como:

$$\mu(\dot{\gamma}) = (\mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty})(1 + (\lambda\dot{\gamma})^{\alpha})^{\frac{n-1}{\alpha}}) \quad (3)$$

Donde  $\mu_0$  es la viscosidad a velocidad de corte cero y se conoce como la meseta newtoniana superior,  $\mu_{\infty}$  es la viscosidad infinita y se evidencia una mesa newtoniana inferior.  $\lambda$  es el recíproco de la tasa de cizallamiento crítica, que describe el inicio del régimen de adelgazamiento por cizalla o también se conoce como el tiempo relación máximo. En reología, el tiempo de relación, es una constante característica del fluido que mide cuánto tarda las cadenas poliméricas en reorganizarse o relajarse después de haber sido sometidas a un esfuerzo. Finalmente, el parámetro  $\alpha$  describe con qué suavidad el régimen newtoniano se fusiona con la ley de potencia.

La viscosidad de la solución polimérica que fluye a través del medio poroso se conoce como viscosidad aparente y se estima mediante la ley de Darcy. No obstante, para comparar los datos del viscosímetro y del medio poroso, las velocidades de flujo en el medio poroso se deben convertir en tasas de cizallamientos aparentes utilizando correlaciones semiempíricas.

### 2.5.3 *Modelo de Canella*

Canella et al. (1988) propuso un modelo que relaciona la reología de soluciones poliméricas de Goma Xantana en viscosímetros con su comportamiento en medios porosos. A través de experimentos en núcleos de diferentes permeabilidades, litologías (arenisca y carbonato) y saturaciones de petróleo, los autores desarrollaron una ecuación que determina la tasa de corte

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

aparente a partir de la velocidad de fluido en el medio poroso, tal como se muestra en la ecuación (5).

$$\gamma_{\text{aparente}} = C \left( \frac{3n + 1}{4n} \right)^{\frac{n}{n-1}} * \frac{u}{\sqrt{k\phi}} \quad (4)$$

Donde  $n$  es el índice de ley de potencia,  $C$  es una constante empírica,  $u$  la velocidad Darcy,  $k$  es la permeabilidad al agua y  $\phi$  la porosidad. Canella et al. (1988) concluyeron que  $C = 6.0$  se ajusta a sus datos experimentales de inyecciones de núcleos de biopolímeros de Goma Xantana. Sin embargo, Wreath et al. (1990) observaron que, para los polímeros de poliacrilamidas hidrolizadas,  $C$  depende de la permeabilidad y la porosidad del medio.

### 3. Metodología

El proceso de estudio de los geles poliméricos incluye diversas fases clave. En esta investigación, otros investigadores vinculados al proyecto seleccionaron un grupo de formulaciones adecuadas para la aplicación, donde se requerían tiempos de gelificación en un rango de 8-10 horas.

#### 3.1. Fase I: Preparación, selección y medición de propiedades de la solución

En la fase 1, se prepararon las formulaciones con concentraciones de polímero de 10000 ppm, 15000 ppm y 20000 ppm, una relación HPAM-PEI de 4:1 y 2:1, y una relación HPAM-KCl de 2:1 y 1:1. Posteriormente, se estimó el tiempo de gelificación y la rigidez de las formulaciones mediante pruebas de botella y el uso del código de Sydansk. Con base en los resultados, se

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

seleccionaron las formulaciones más adecuadas para su aplicación, considerando tanto la consistencia final como el tiempo de gelificación. Finalmente, las formulaciones seleccionadas se sometieron a una evaluación reológica, mediante mediciones de viscosidad en función de la velocidad de cizallamiento y el tiempo utilizando un reómetro rotacional.

### 3.1.1 Procedimiento para la preparación de geles poliméricos

Los sistemas de geles poliméricos fueron evaluados bajo las condiciones de la formación del yacimiento de interés. Se estableció una temperatura de 65°C y una salmuera sintética con una salinidad de 1039 ppm distribuida en 270 ppm de cloruro de sodio (NaCl), 800 ppm de bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>) y 40 ppm de cloruro de calcio dihidratado (CaCl<sub>2</sub>\*2H<sub>2</sub>O).

Por parte de los polímeros utilizados, fueron compuestos basados en poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM), cuyas propiedades se presentan en la Tabla 2, con respecto al agente entrecruzador, se adquirió la polietilenimina, de naturaleza orgánica.

**Tabla 2**

*Propiedades del polímero*

<b>Compañía</b>	<b>Peso molecular (Da)</b>	<b>Grado de hidrólisis (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>
SNF	5x10 <sup>5</sup> (Bajo)	7.38	6.61
	7-10x10 <sup>6</sup> (Alto)	12.33	6.12

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

No obstante, en algunos casos, las condiciones del yacimiento y el diseño preliminar de las formulaciones no permiten que el proceso de gelificación sea prolongado y como consecuencia se produzcan tiempos de gelificación muy cortos. Como alternativa, diversas investigaciones han llegado a la conclusión de utilizar aditivos en la formulación que tengan la función de prolongar el tiempo de gelificación (Amir et al., 2018); sin embargo, su adición puede impactar negativamente la estabilidad del sistema; por esta razón, su uso debe ser cuidadosamente diseñado. Generalmente, los compuestos más utilizados para este fin corresponden a sales de diferente naturaleza. En este caso en específico, se utilizó cloruro de potasio (KCl) como agente retardante.

La evaluación del diseño experimental se hizo mediante pruebas de botellas con el código Sydansk mostrado y se establecieron como variables objetivas, el tiempo de gelificación y el máximo grado de rigidez alcanzado por el gel.

### 3.1.1.1. Preparación de la solución madre de mezcla de polímero

Con base a los procedimientos recomendados de preparación y mezcla de soluciones poliméricas expuestos en la norma API-RP 63, para preparar la solución madre de polímero se estableció inicialmente una carga base de polímero de alto peso molecular, una carga aditiva de polímero de bajo peso molecular y el volumen de solución acuosa a trabajar.

Seguidamente, se calculó la cantidad de producto de polímero, utilizando la ecuación (6)

$$\text{Peso polímero } (W_p) = \frac{C_p * \text{Volumen a preparar(litros)}}{1 - \% \text{Humedad}} \quad (5)$$

Donde  $C_p$ , es la concentración de polímero en la solución (ppm).

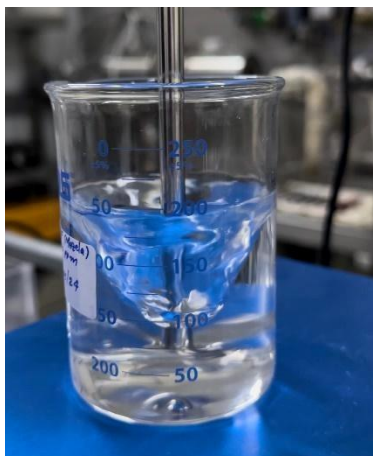
## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Se estableció una carga base de HPAM de alto peso molecular de 5000 ppm y una carga aditiva de HPAM de bajo peso molecular que varió entre 5000 y 15000 ppm hasta lograr la concentración total de polímero.

Para el proceso de integración del polímero en estado sólido en la solución acuosa, se estableció como primera instancia la velocidad de agitación del agitador aéreo en 400 rpm, este valor garantiza la generación de un vórtice que ocupa aproximadamente el 75% del volumen del vaso precipitado. Posteriormente, se comenzó agregando el polímero de alto peso molecular gradualmente sobre el hombro del vórtice de manera continua, formando un hilo, en intervalos de tiempo de 30 s a 1 min, seguido de la adición del polímero de bajo peso molecular. La Figura 13 ilustra el efecto de vórtice que se debe generar para obtener una integración óptima del polímero en solución acuosa.

### **Figura 13**

*Efecto de vórtice en el proceso de agitación de la solución polimérica*



## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Después de agregar bien el producto, se dejó en agitación/hidratación por 3 horas para asegurar la homogeneidad de la solución polimérica. Es importante tener un control visual de la solución, ya que, si durante el período de agitación se observa la formación de grumos u “ojos de pescado” se debe iniciar nuevamente todo el procedimiento.

### 3.1.1.2. Preparación del gel

El proceso de preparación del gel polímero consistió en establecer inicialmente la relación polímero/entrecruzador y la cantidad de aditivos a evaluar según el diseño experimental. Luego, se incorporó el volumen de la solución polimérica previamente hidratado en salmuera, junto con la proporción establecida de retardante, y se sometió a agitación durante 15 minutos. Por último, se añadió el entrecruzador al sistema y se mantuvo en agitación por otros 15 minutos. Finalizado los 30 min se depositó en un recipiente de tubular de vidrio que pueda manipularse fácilmente y realizar análisis cualitativos mediante la observación, como la aplicación del código de Sydansk. La Figura 14 muestra el estado inicial del gel, un fluido viscoso, fluido y de color transparente.

### Figura 14

*Preparación del gel polimérico*



## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### *3.1.2 Medición del tiempo de gelificación y comportamiento reológico del gel*

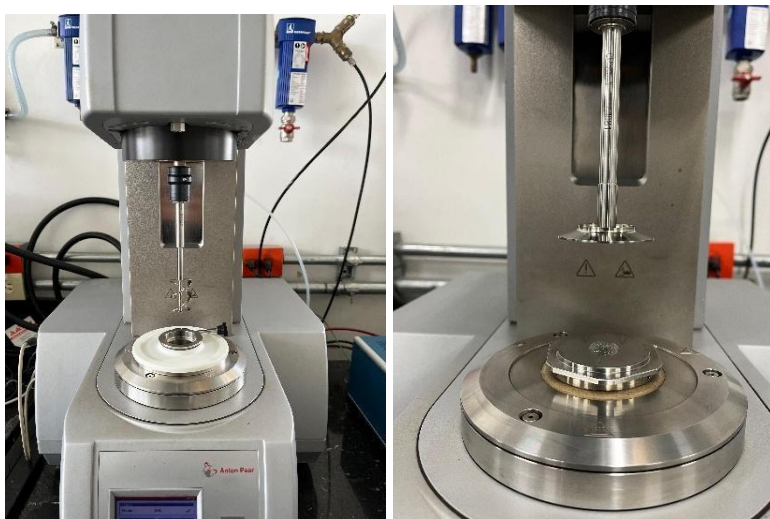
Se evaluó el comportamiento reológico del gel y la solución polimérica a partir de mediciones del tiempo de gelificación y de la viscosidad en función de la velocidad de cizallamiento utilizando un reómetro modular compacto de la serie MCR 302 de la compañía Anton Paar, ubicado en el Grupo de Investigación de Fenómenos Interfaciales, Reología y Simulación de Transporte (FIRST). Se empleó la geometría de celda cilíndrica con hélice helicoidal para la medición del tiempo de gelificación y la geometría cono – plato para la determinación de la viscosidad (ver Figura 15).

Para realizar la medición fue importante seguir el procedimiento de acondicionamiento del motor del reómetro, control del baño térmico, calibración de la geometría seleccionada y finalmente establecer los parámetros de medición. Estos parámetros se basaron en establecer la cantidad de puntos a medir de viscosidad, el tiempo que tardará medir cada punto y finalmente establecer el gap o separación entre la geometría y la celda. En este caso, se definió medir 40 puntos, con un tiempo de 15 segundos por punto y un gap de 1.138 mm para la geometría con hélice helicoidal y 0.101 mm para la geometría cono plato. Ambos sistemas estuvieron a temperatura de 65°C.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 15**

*Geometría cilindros concéntricos con hélice helicoidal / Geometría cono - plato*



La elección de una geometría de celda cilíndrica con hélice helicoidal para la determinación del tiempo de gelificación, se fundamentó en las características del fluido, las cuales presentaron sensibilidad a la temperatura y a la pérdida de alguno de los componentes del sistema. Así mismo, la hélice garantizó que el fluido recibiera un esfuerzo cortante uniforme, un parámetro fundamental para medir con precisión la evolución de la viscosidad durante el proceso de gelificación.

La geometría seleccionada consistió en un cilindro fijo que contuvo la muestra y una hélice helicoidal que rotó dentro del cilindro, inmerso en el fluido. Al girar la hélice, esta arrastró el fluido en una dirección helicoidal, combinando rotación y traslación axial del fluido. Una ventaja de esta configuración, fue minimizar los riesgos de evaporación del agua, lo cual es crítico en procesos que requieren estar sometidos a una temperatura constante y de larga duración. Para tener un mejor control del sistema, se aplicó una capa de aceite silicona sobre la superficie de la muestra, lo que contribuye a evitar la pérdida de humedad y separación de fases. Adicionalmente, la

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

inclusión de la hélice mejoró el mezclado interno y aseguró una distribución más uniforme del esfuerzo de corte en todo el volumen de la muestra.

Por otro lado, para la determinar el comportamiento de la viscosidad en función de la velocidad de cizallamiento, se utilizó la geometría cono – plato, la cual consta de un cono móvil en la parte superior y una placa fija en la parte inferior.

La muestra se colocó entre ambas superficies y el cono giró a una velocidad angular constante. El movimiento del cono crea un esfuerzo de corte y una tasa de cizalla uniforme en toda la muestra debido al ángulo tan pequeño del cono (generalmente inferior a  $4^\circ$ ). Esto permite obtener datos precisos de viscosidad y esfuerzo cortante sin necesidad de aplicar correcciones mediante modelos matemáticos por variación radial como ocurre con otras geometrías. Entre otras de las ventajas se destaca que requiere volúmenes de muestra muy pequeño (menores a 1mL) y, además, permite una excelente transferencia de calor y control de temperatura, lo cual garantiza que los cambios de viscosidad no se deban a fluctuaciones térmicas (Campbell & Spalding, 2021).

### **3.2. Fase 2: Pruebas de desplazamientos**

En la fase 2, se realizó el montaje de las pruebas de desplazamientos. Para ello, se comenzó con la construcción o preparación del medio poroso, después se saturó con salmuera para determinar la porosidad mediante balance de masa. Posteriormente, se inyectó salmuera a diferentes tasas para calcular la permeabilidad absoluta al agua utilizando la ecuación de Darcy.

Con el medio poroso listo, este se calentó a la temperatura correspondiente al yacimiento por al menos 24 horas. Seguidamente, se inyectó la formulación seleccionada, con y sin entrecruzador (cada una en una prueba de desplazamiento diferente), a diferentes tasas. Y finalmente, se calculó la viscosidad aparente en el medio poroso a partir de la ley de Darcy

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

empleando las tasas de inyección aplicadas y los diferenciales de presión registrados durante la prueba.

### **3.2.1. Preparación y acondicionamiento del medio poroso para la inyección de la solución polimérica**

El medio poroso se construyó con 248 g de arena Ottawa (malla 80/100) en una manga de Viton de diámetro interno de 3.75 cm y una longitud de 36.6 cm. El sistema de ensamblaje consistió en los siguientes elementos:

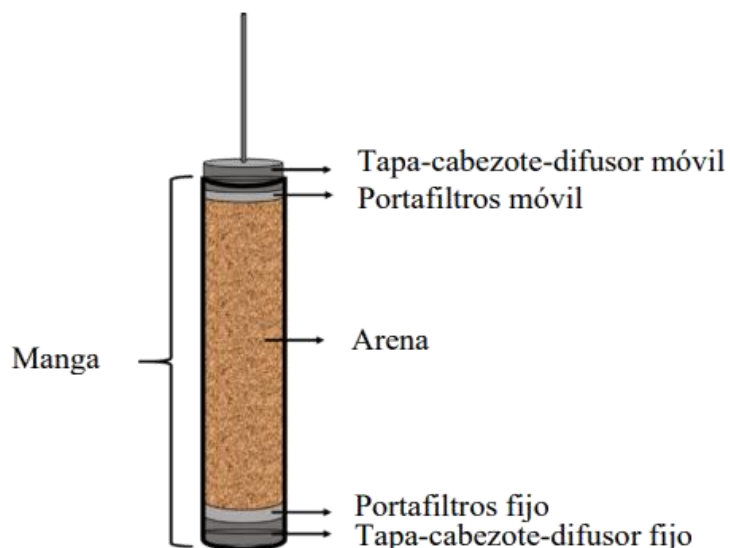
1. Cabezote fijo con una longitud de 2.25 cm.
2. Portafiltros fijo con una longitud de 0.83 cm y un diámetro interno de 2.77 cm.
3. Arena o medio poroso con una longitud efectiva por determinar.
4. Portafiltros móvil con una longitud de 0.83 cm y un diámetro interno de 2.77 cm.
5. Cabezote móvil con una longitud de 3.61 cm.

La Figura 16 muestra un esquema general del estado final del empaque de arena.

### **Figura 16**

*Esquema del empaque de arena construido.*

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO



A medida que se agregó la arena, se realizó una agitación continua del sistema para garantizar que los granos se organizaran de manera uniforme. Posteriormente, se determinó la longitud efectiva del paquete de arena considerando las longitudes de la manga, cabezote fijo, portafiltros y la porción del cabezote móvil que sobresalió, dando como resultado un valor de 16.6 cm. Luego de su construcción, el medio poroso fue ensamblado dentro del *coreholder* y montado en el equipo STEAM LDE para la ejecución de la respectiva prueba de desplazamiento, estableciendo una presión de confinamiento de 800 psi mediante la adición de aceite mineral en el anular entre manga y el *coreholder*.

### 3.2.2. Medición de la porosidad efectiva

La porosidad efectiva hace referencia al volumen ocupado por los poros interconectados que permiten el flujo de fluidos a través de ellos. Para medir esta propiedad, se inició la inyección de salmuera a una tasa de  $2 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Durante este proceso, se realizó un balance de materia para determinar la cantidad de agua almacenada en el sistema a partir de la diferencia de las cantidades

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

de agua producida e inyectada. Además, fue necesario considerar el volumen muerto correspondiente a la línea, cabezotes (fijo y móvil) y el volumen inicial y final de la bomba.

El volumen de la bomba de inyección inició con un valor de 466.78 cm<sup>3</sup> y finalizó en 367.79 cm<sup>3</sup>, dando como resultado un volumen de agua inyectada de 98.99 cm<sup>3</sup>. Así mismo, se registró que el agua producida tuvo una masa de 50.8 g y asumiendo una densidad de salmuera de 1.03 g/cm<sup>3</sup> a 25 °C (temperatura de la prueba), se obtuvo un volumen de agua producida de 49.32 cm<sup>3</sup>. El volumen muerto consistió en 2.44 cm<sup>3</sup>, el cual correspondió a los volúmenes internos de los cabezotes y una parte de la línea de inyección. Así entonces, se determinó un volumen poroso real de 47.23 cm<sup>3</sup> y una porosidad efectiva de 30.21 %.

### 3.2.3. Medición de la permeabilidad absoluta al agua

La determinación de la permeabilidad absoluta se logró mediante la aplicación de la ecuación de Darcy (7) la cual modela el flujo de fluidos a través de un medio poroso.

$$Q = \frac{K\Delta P A_T}{245\mu L} \quad (6)$$

Donde  $Q$  hace referencia al caudal (cm<sup>3</sup>/min),  $K$  la permeabilidad (mD),  $\Delta P$  el diferencial de presión (psi),  $A_T$  el área transversal de flujo (cm<sup>2</sup>),  $\mu$  la viscosidad del fluido (cp),  $L$  la longitud del medio (cm) y el 245 representa un factor de conversión para manejar las unidades descritas en el presente párrafo.

Reorganizando la ecuación original, se obtiene una ecuación que tenga la forma de una línea recta:

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

$$\frac{245Q}{A_T} = K \frac{\Delta P}{\mu L} \quad (7)$$

Bajo esta primicia, se tomaron diferentes caudales y sus respectivas mediciones del diferencial de presión para obtener varios puntos y determinar una pendiente que representara la permeabilidad del medio poroso. Ahora bien, el proceso consistió en la inyección de salmuera a diferentes tasas hasta obtener un diferencial de presión estable, a partir del cual se calcularon los respectivos valores de permeabilidad al agua mediante la Ley de Darcy mostrada en la ecuación (7).

Con un área transversal de 11.10 cm<sup>2</sup>, una longitud efectiva del empaque de arena de 13.18 cm, una viscosidad del agua de 0.99 mPa\*s y los puntos de caudal-diferencial de presión (Tabla 3), se determinó la permeabilidad absoluta al agua.

**Tabla 3**

*Puntos de caudal y diferencial de presión para la inyección de polímero*

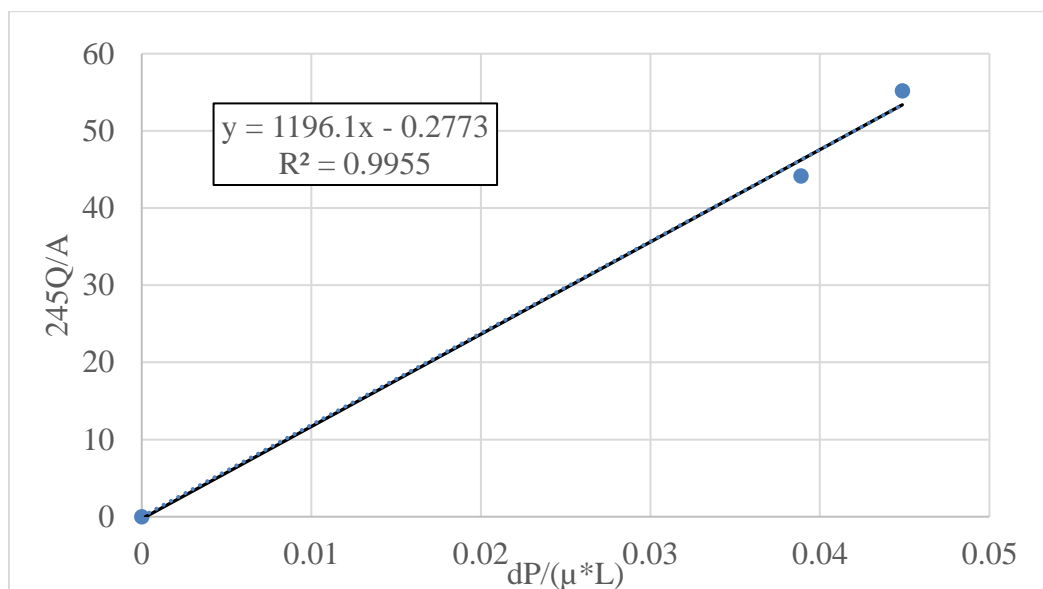
<b>Caudal (cm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>Diferencial de presión (psi)</b>
2	0.52
2.5	0.6

Como se puede observar en la Figura 17 se obtuvo un valor de permeabilidad absoluta al agua de aproximadamente 1196.1 mD.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 17**

*Permeabilidad absoluta al agua para la inyección de la solución polimérica*



### 3.2.4. Inyección de la solución polimérica

El sistema de desplazamiento incluye principalmente la bomba conectada a los cilindros tipo *freepiston*, *coreholder*, transductores de alta, media y baja presión, válvulas de entrada y salida que controlan el paso de los fluidos y recolector de muestra.

Después de preparar y ensamblar el medio poroso en el equipo STEAM LDE se cargó el cilindro con la solución polimérica y se calentó el medio poroso a la temperatura del yacimiento (65°C). Posteriormente, se inyectó un preflujo con salmuera. Luego, las inyecciones del polímero comenzaron con el caudal mínimo de 1.5 cm<sup>3</sup>/min y luego se incrementaron gradualmente. La caída de presión se monitoreó continuamente durante la inyección de polímero y finalmente, se recolectaron sus respectivos efluentes.

### 3.2.5. Inyección del gel polimérico

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

La metodología anteriormente descrita, se implementó para llevar a cabo la inyección de la solución gelificante. Para ello, se construyó un medio poroso con 258 g de arena Ottawa (malla 80-100), con una longitud efectiva del paquete de arena de 13.18 cm y una presión de confinamiento de 800 psi.

La medición de porosidad se llevó a cabo siguiendo la metodología anteriormente descrita. El volumen inicial de la bomba fue de 461.97 cm<sup>3</sup> y finalizó en 371.72 cm<sup>3</sup>, dando como resultado un volumen de agua inyectada de 90.25 cm<sup>3</sup> y se registró el agua producida con una masa de 41.8 g. Seguidamente, se calculó un volumen poroso real de 47.22 cm<sup>3</sup> y una porosidad efectiva de 30.27 %.

A partir de los caudales inyectados y los diferenciales de presión registrados en la Tabla 4, como se puede observar en la Figura 18 se obtuvo un valor de permeabilidad absoluta al agua de aproximadamente 1187.98 mD.

**Tabla 4**

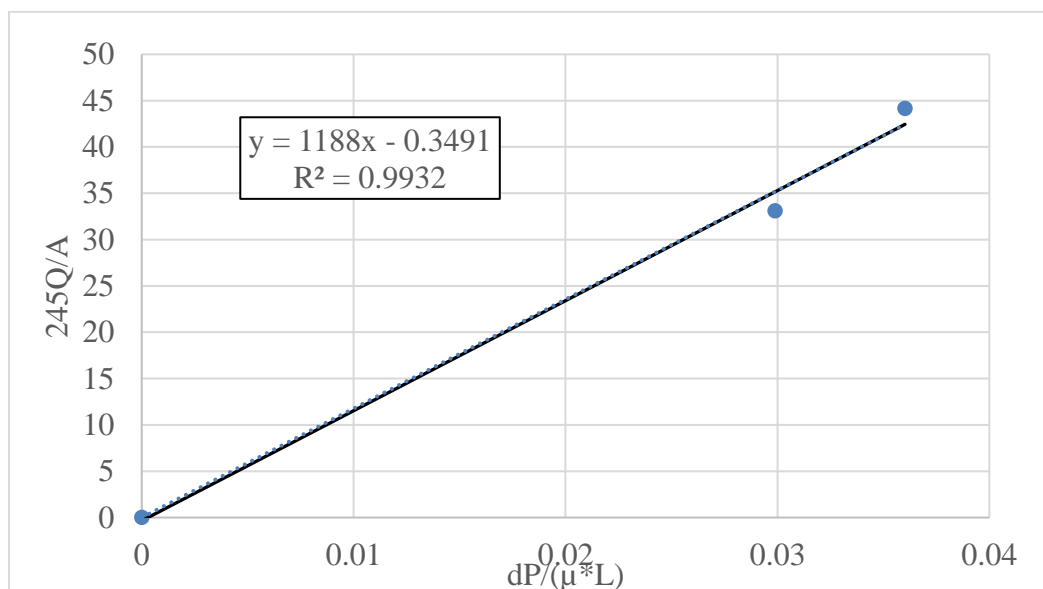
*Puntos de caudal y diferencial de presión para la inyección del gel*

<b>Caudal (cm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>Diferencial de presión (psi)</b>
1.5	0.39
2	0.47

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 18**

*Permeabilidad absoluta al agua para la inyección del gel*



Después de preparar y ensamblar el medio poroso en el equipo STEAM LDE se cargó uno de los cilindros con la solución gelificante y se estableció la temperatura del yacimiento en el medio poroso, la cual correspondió a 65 °C. Cabe mencionar, que la colocación de la formulación en el medio debía realizarse lo más rápido posible ya que las reacciones de entrecruzamiento inician una vez se agregue y se mezcle el agente entrecruzador, por lo tanto, se debe asegurar que no haya riesgo de gelificación en las líneas. Finalmente, se inyectaron las tasas de gel seleccionadas.

Por otro lado, la ley de Darcy es una de las teorías más conocidas que describen el flujo de fluidos a través de un medio poroso. A continuación, para ambas pruebas de desplazamiento, se calculó la viscosidad aparente del fluido no newtoniano que relaciona el caudal, el diferencial de presión, la permeabilidad y la longitud del medio utilizado.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

$$\mu_{app} = \frac{KA_T \Delta P}{245QL} \quad (8)$$

### 3.3. Fase 3: Ajuste prueba del reómetro y pruebas de desplazamiento

En la fase 3, se tomó como referencia el modelo desarrollado por Cannella et al. (1988), para soluciones poliméricas de Goma Xantana y se estableció un protocolo general que permitió correlacionar las mediciones de viscosidad obtenidas en el reómetro a diferentes velocidades de cizallamiento con los respectivos resultados en las pruebas de desplazamiento a distintas tasas de inyección.

Con base a lo anterior, se determina la tasa de cizallamiento del medio poroso para cada tasa de inyección con la ecuación 10:

$$\gamma_{aparente} = C \left( \frac{3n + 1}{4n} \right)^{\frac{n}{n-1}} \frac{u}{\sqrt{k\phi}} \quad (10)$$

El modelo de Cannella incorpora un parámetro de ajuste, denotado como C, el cual es característico de las propiedades de la roca y que permite convertir las velocidades de flujo en el medio poroso a velocidades de cizallamiento. De este modo, mediante la variación de C se busca correlacionar las viscosidades determinadas en las pruebas de desplazamiento con las medidas en el reómetro, procurando superponer ciertas secciones de ambas curvas. La superposición lograda indica que se obtuvo un buen ajuste del modelo para representar el comportamiento reológico del fluido en el medio poroso.

## 4. Análisis de resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en cada una de las fases:

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### 4.1. Fase 1: Preparación, selección y medición de propiedades de la solución

La selección de la formulación gelificante más favorable partió del desarrollo de una matriz experimental elaborada en el marco de un proyecto cuyo objetivo principal es diseñar una formulación para bloquear un acuífero activo en un yacimiento de crudo pesado en Colombia a través del análisis de parámetros que restringen su aplicabilidad. Para ello, la formulación debía cumplir con características específicas tales como alcanzar el radio de invasión sin afectar la integridad de la roca.

La presión de fractura es un parámetro que indica el valor máximo de presión que soporta una formación antes de fracturarse. En consecuencia, la viscosidad del fluido inyectado no debe desarrollar un diferencial de presión que sobrepase dicha presión. Asimismo, el tiempo de gelificación debe ser lo suficientemente largo, de manera que permita ubicar el gel dentro de la formación de interés y no genere taponamientos en las tuberías durante su inyección. En este caso de estudio, partiendo del hecho de que en la cara de la formación se desarrollarían altas tasas de corte (superiores a  $1000 \text{ s}^{-1}$ ), se estableció definir soluciones gelificantes cuyas viscosidades no excedieran los  $20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  a  $1000 \text{ s}^{-1}$ , y un rango para el tiempo de gelificación entre 8-10 horas a  $65^\circ\text{C}$ .

En ese sentido, se prepararon geles poliméricos híbridos cuya base es una mezcla de polímeros de alto y bajo peso molecular, un agente entrecruzador y un retardante. Las proporciones de los componentes químicos fueron: una relación HPAM-PEI de 4:1 y 2:1, y una relación HPAM-KCl de 2:1 y 1:1. Es importante destacar que los polímeros de alto peso molecular consisten en moléculas de mayor tamaño que ocasionan viscosidades excesivamente altas y, por consiguiente, geles más fuertes y rígidos. Por otro lado, los polímeros de bajo peso molecular producen viscosidades menores que no generan cambios significativos en su comportamiento pero

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

que, si requieren una mayor cantidad de moléculas, lo cual representa mayores costos en la preparación.

Los geles híbridos se prepararon en concentraciones de 10000 ppm, 15000 ppm y 20000 ppm. Para ello, se estableció una carga base fija de 5000 ppm de polímero de alto peso molecular, mientras que la carga adicional correspondió a polímero de bajo peso molecular, variando entre 5000, 10000 y 15000 ppm para completar la concentración total deseada.

El proceso de gelificación de las formulaciones en estudio, se evaluó mediante el monitoreo visual en un periodo de 24 horas, utilizando la clasificación del código de Sydansk, el cual permite identificar el grado de desarrollo o evolución del gel. En ese sentido, en la Figura 19 se observa el estado inicial de los geles (tiempo cero), caracterizado por ser sistemas completamente líquidos, transparentos y sin cambios visualmente percibibles en su viscosidad o indicios de formación del gel. Este comportamiento corresponde a la clasificación “A” según el código de Sydansk. El monitoreo de los geles inició una vez las formulaciones fueron expuestas a la temperatura de interés (65°C) y la evolución de cada sistema fue registrada en intervalos de una hora con su respectivo código de gelificación en las tablas 12-23 (ver Apéndice). Asimismo, es importante destacar que la transición del código “A” al código “C” corresponden al intervalo en el cual los geles evolucionan de un estado de baja viscosidad y alta fluidez hacia un estado más estructurados y consistentes, con una movilidad más restringida. Este cambio refleja el punto crítico asociado al tiempo inicial de gelificación del sistema.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Figura 19

*Estado inicial de geles poliméricos*

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Como se evidencia en la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7, los resultados mostraron que los geles lograron alcanzar un código “C” en un rango entre las 7 y 12 horas. Este tiempo es conocido como el tiempo inicial de gelificación.

**Tabla 5**

*Tiempo de gelificación test de Sydansk – Variación de PEI y KCl – SNF 10000 ppm.*

<b>Tiempo de gelificación (horas)</b>			
<b>10000 ppm SNF</b>		<b>Relación polímero-retardante</b>	
		2:1	1:1
<b>Relación polímero- entrecruzador</b>	2:1	6 horas	8 horas
	4:1	7 horas	9 horas

**Tabla 6**

*Tiempo de gelificación test de Sydansk – Variación de PEI y KCl – SNF 15000 ppm.*

<b>Tiempo de gelificación</b>			
<b>15000 ppm SNF</b>		<b>Relación polímero-retardante</b>	
		2:1	1:1
<b>Relación polímero- entrecruzador</b>	2:1	7 horas	9 horas
	4:1	8 horas	9 horas

**Tabla 7**

*Tiempo de gelificación test de Sydansk – Variación de PEI y KCl – SNF 20000 ppm.*

<b>Tiempo de gelificación</b>			
<b>20000 ppm SNF</b>		<b>Relación polímero-retardante</b>	
		2:1	1:1
<b>Relación polímero- entrecruzador</b>	2:1	7 horas	10 horas
	4:1	10 horas	11 horas

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Uno de los factores que explica este comportamiento, es el efecto de la concentración del polímero. Aumentar la concentración de polímero, incrementa la cantidad de grupos funcionales de ácido carboxílico disponibles para reaccionar con el entrecruzador, a su vez, a mayor concentración, el número de moléculas por unidad de volumen también incrementa, por ende, la distancia entre las cadenas poliméricas disminuye gradualmente hasta que se superponen y se entrelazan, lo que acelera la gelificación del sistema y ofrece una mayor resistencia del gel (Jia et al., 2012; Wang et al., 2024). Sin embargo, en las concentraciones más altas (15000 y 20000 ppm), el tiempo inicial de gelificación se mantuvo constante, ya que, aunque existen más sitios disponibles en la cadena polimérica para reaccionar, ya no habrá suficiente PEI para entrecruzar las mismas. Por lo tanto, aumentar la concentración de HPAM no mejorará el rendimiento de la gelificación y si genera un uso ineficiente del reactivo.

Por otro lado, se evaluó el efecto de la concentración del entrecruzador en sistemas que utilizaron 2500 y 5000 ppm de PEI, y de forma similar al efecto de la concentración del polímero, el aumento de la concentración del entrecruzador redujo el tiempo de gelificación y los cambios en la resistencia del gel parecían ser más lentos (G. Al-Muntasheri, Nasr-El-Din, & Hussein, 2007; Jia et al., 2012).

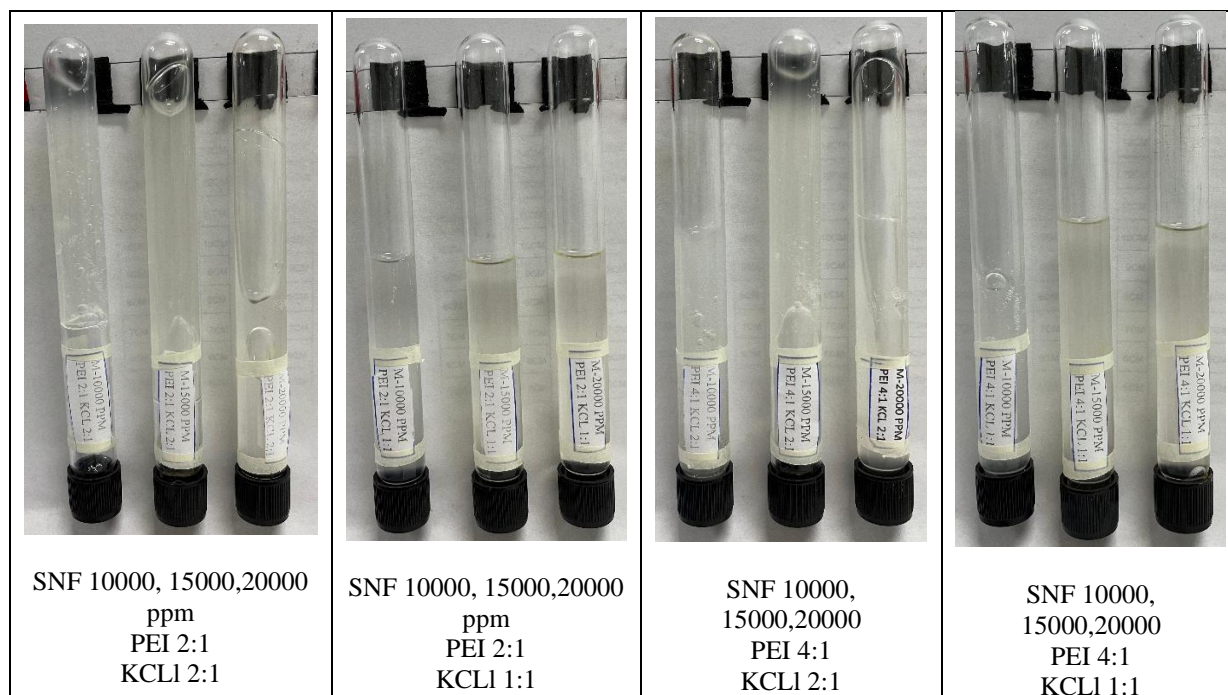
Otro factor importante es el contenido de retardante. Se puede observar que cuanto mayor cantidad se agregara de retardante (KCl) al sistema, mayor es el tiempo de gelificación. El efecto de la salinidad sobre las propiedades del gel puede estar relacionado con la contracción o enrollamiento de las cadenas poliméricas entre sí, lo que dificulta el acceso del entrecruzador a los grupos funcionales del polímero y, por tanto, se retarda la reacción de entrecruzamiento (El Karsani et al., 2014b; Guo et al., 2022).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

En la Figura 20 se observa el estado de los sistemas gelificantes trascurridas 8 horas de iniciar el proceso de entrecruzamiento. Los geles con menor cantidad de sal (KCl), es decir, relaciones 2:1 permanecen en un estado más fluido, código “B”, sin incrementos significativos en la viscosidad respecto a la solución inicial. Caso opuesto ocurre con los geles de mayor cantidad de sal (1:1), los cuales muestran un comportamiento más viscoso y un movimiento más restringido, códigos entre “C” y “D”. Esto refleja un mayor grado entrecruzamiento y avance en la gelificación. Estos resultados confirman que la sal, en conjunto con el polímero y el PEI, aceleran y favorecen la formación de la red tridimensional del gel.

**Figura 20**

*Estado de los sistemas gelificantes después de 8 horas de monitoreo*



## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Finalmente, según las observaciones realizadas en las pruebas de botella se estableció que la formulación gelificante diseñada a partir de la solución polimérica híbrida de 10000 ppm de SNF (5000 ppm de alto peso molecular y 5000 ppm de bajo peso molecular), una relación polímero-entrecruzador (PEI) 4:1 y una relación polímero-retardante (KCl) 1:1 permitió obtener tiempos de inicio de gelificación cercanos a las 10 horas y además, transcurridas las 24 horas alcanzó la formación de un gel no fluido (código F, según el test de Sydanks). Estas características, evidencian la viabilidad de la formulación para su aplicación en el caso de estudio.

Sin embargo, para confirmar el tiempo de gelificación de esta formulación, se realizó un monitoreo de su viscosidad utilizando el reómetro con una geometría de cilindro con hélice helicoidal, manteniendo una tasa de corte constante de  $100 \text{ s}^{-1}$ , una temperatura de  $65^\circ\text{C}$  y un tiempo de prueba entre 10 y 14 horas. Las mediciones de viscosidad se realizaron periódicamente en intervalos de 1 hora para la respectiva construcción de la curva de viscosidad en función del tiempo.

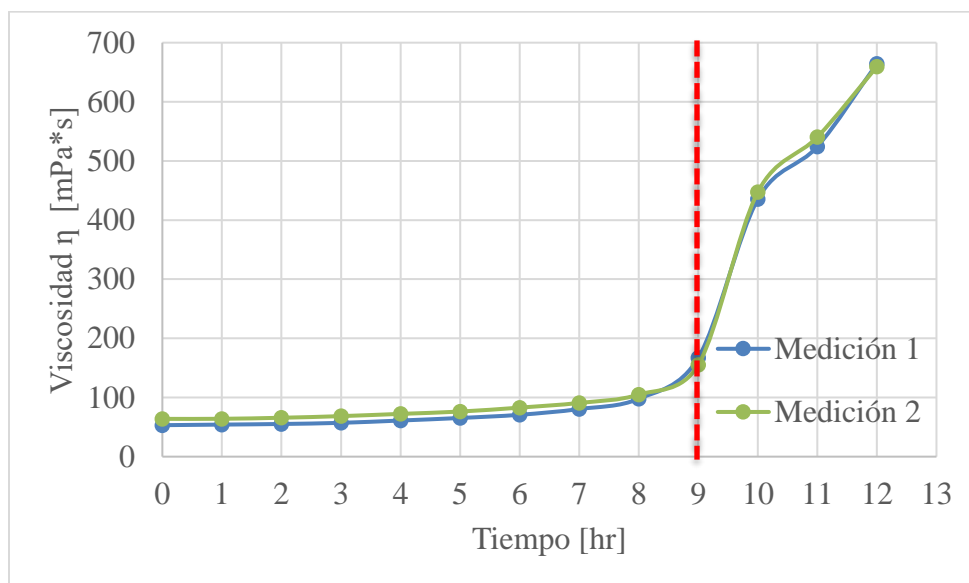
El tiempo de gelificación se observa midiendo la viscosidad, la cual aumenta gradualmente a medida que empieza a formarse el gel, y registrando el momento en que su valor alcanza un punto de inflexión, el cual corresponde al inicio de la formación del gel. Como se puede observar en la Figura 21, durante las primeras 4 horas, la viscosidad no evidenció cambios significativos, manteniendo valores alrededor de  $53 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , esto es un indicio de que aún no se ha formado gel debido a que el proceso de entrecruzamiento es lento. A partir de aproximadamente 9 horas, la viscosidad aumentó rápidamente alcanzado un valor de  $167.11 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , lo que indica el inicio de gelificación. Este repentino aumento de la viscosidad, se debe a la formación progresiva de enlaces entre las cadenas poliméricas y el entrecruzador, lo que da lugar a la formación de una estructura tridimensional de gel menos fluida. Así mismo, en la medida que va aumentando el tiempo, la

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

interacción se intensifica y, por ende, se confirma la formación de un gel más rígido con valores de viscosidad de hasta 664.44 mPa\*s.

**Figura 21**

*Tiempo de gelificación gel SNF 10000 ppm – PEI 4:1 – KCl 1:1*



En complemento con lo anterior, el análisis reológico de la solución gelificante y su solución polimérica se realizó con el fin de caracterizar la evolución del comportamiento del sistema. El estudio de la solución polimérica permite establecer el estado inicial del fluido precursor, en términos de viscosidad y dependencia de la tasa de cizallamiento, lo cual constituye una referencia para interpretar los cambios que pueden ocurrir en el gel. Ambos fluidos fueron evaluados en el reómetro utilizando la geometría cono-plato, la cual resulta adecuada para este tipo de muestras por su rango de viscosidades entre bajas a medias. Entre otras de sus ventajas, se destaca el ángulo pequeño del cono, lo cual permite generar una tasa de cizallamiento constante en toda la muestra. No obstante, esta geometría presenta limitaciones cuando se utilizan sistemas

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

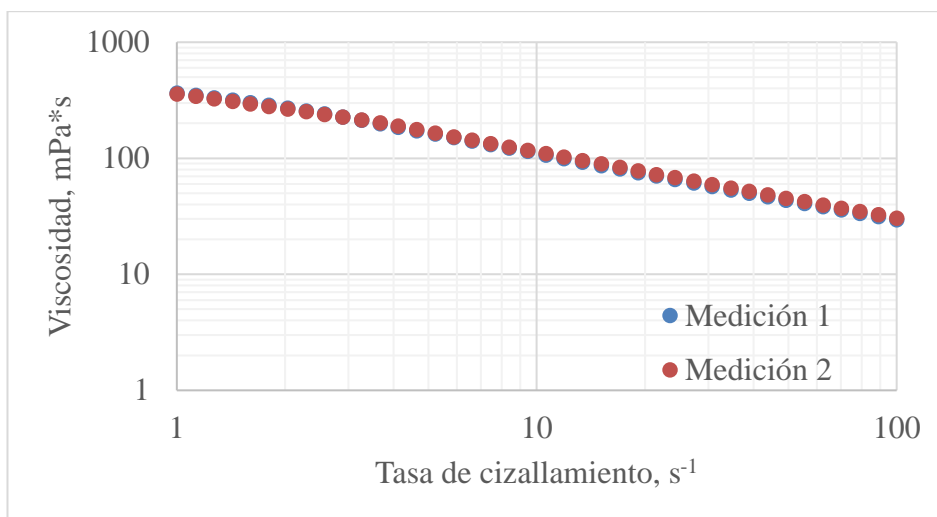
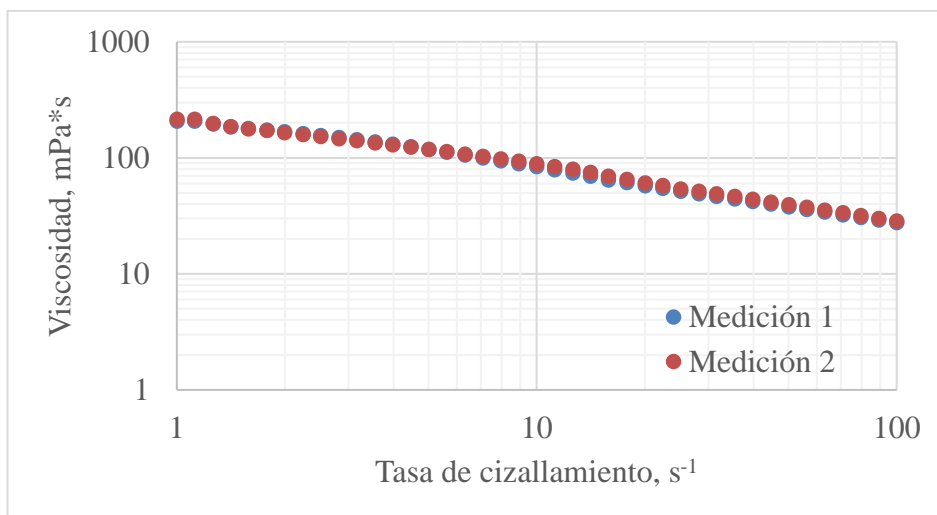
que contienen partículas grandes ya que puede inferir en mediciones erróneas (Chhabra & Richardson, 2008; Yadav & Mahto, 2013).

Una vez preparadas las muestras, de forma inmediata estas fueron sometidas a diferentes tasas de cizallamiento con el fin de caracterizar su comportamiento reológico utilizando la geometría cono - plato. El rango de medición, comprendido entre 1 y  $100 \text{ s}^{-1}$ , se seleccionó con base en lo reportado en la literatura para sistemas poliméricos y geles en estado fluido, lo cual garantiza la confiabilidad de los datos sin incurrir en comportamientos anómalos (Rousseau et al., 2005). Cada medición tuvo una duración de aproximadamente de 10 minutos, correspondiente al tiempo para cubrir el rango de medida de tasa de cizallamiento seleccionado.

Como se puede observar en la Figura 22 y Figura 23, se evidencia que, con el aumento progresivo de la tasa de cizallamiento, el fluido se encuentra en una región reofluidizante, donde el esfuerzo aplicado provoca el desenredamiento y alineación de las moléculas en la dirección del flujo, lo que resulta en una disminución de la viscosidad (Osswald & Román, 2025). En este régimen, la solución polimérica presentó viscosidad en un rango de aproximadamente 340 y 29  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , mientras que la solución gelificante mostró valores entre 197 y 28  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ .

En contraste con lo observado en este estudio, algunos autores han reportado que a partir de tasas de cizallamiento altas pueden presentarse cambios incrementales anómalos de viscosidad, los cuales no corresponde a un comportamiento reológico normal para este tipo de fluidos, sino que podría estar asociado a limitantes del tipo de geometría utilizada, ya que se puede inducir un régimen donde el fluido no fluye de manera ordenada, sino que tiende a formar un flujo turbulento causados por la alta velocidad de rotación. Es importante aclarar, que este tipo de inestabilidades no debe confundirse con un comportamiento dilatante (Howe et al., 2015).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 22***Reograma solución polimérica – reómetro***Figura 23***Reograma de la solución gelificante – reómetro*

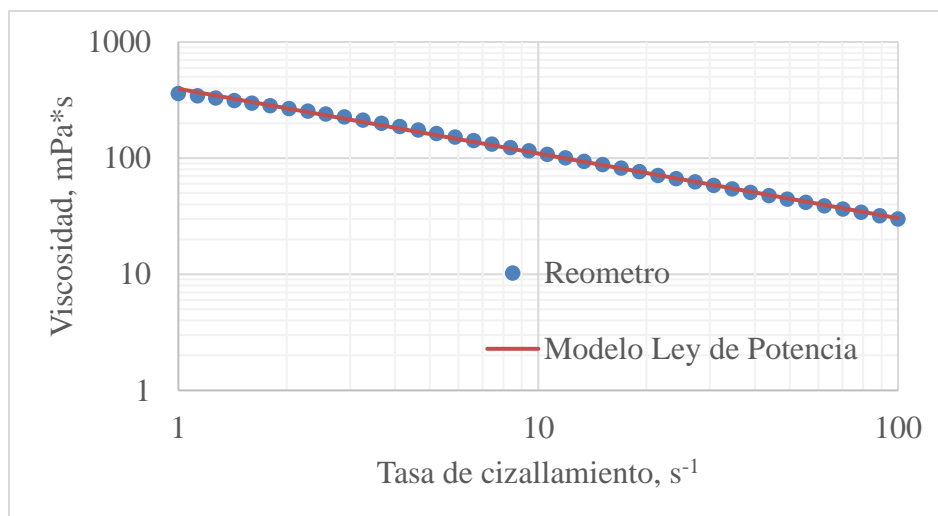
Uno de los modelos reológicos más utilizados en el análisis de fluidos no newtonianos, es la ley de potencia, sin embargo, este modelo tiene una limitante y es que no describe las regiones newtonianas observadas a bajas y altas velocidades de cizallamiento. Por lo tanto, este tipo de modelo solo es apto para representar la región reofluidizante, en este caso de estudio, dicho región

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

se ubica en un rango de velocidades de cizallamiento entre 1 y  $100 \text{ s}^{-1}$ . En ese orden de ideas, tal como se observa en los reogramas obtenidos en la Figura 24 y Figura 25, el comportamiento de los fluidos se ajusta con el modelo expuesto. Además, con este modelo se obtienen parámetros reológicos tales como: el índice de consistencia (K), el cual representa la resistencia del fluido al flujo y, n, también conocido como índice de flujo, el cual describe cómo varía la viscosidad del fluido en función a la tasa de corte. En el caso de las muestras en estudio, se determinaron valores de n de 0.4428 y 0.547 para la solución polimérica y la solución gelificante respectivamente. Estos valores, menores a 1 confirman que ambos fluidos tienen un comportamiento pseudoplástico. Así también, los valores de K obtenidos tanto para la solución polimérica como para la solución gelificante fueron 395.88 y 232.182 respectivamente, los cuales confirman que cuanto mayor es K más viscoso es el fluido, siendo la solución polimérica más viscosa.

### Figura 24

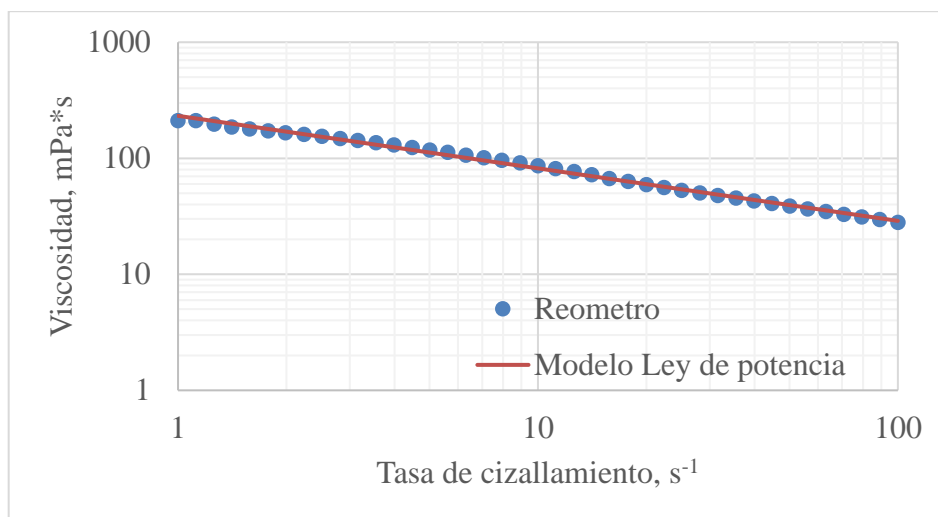
*Ajuste al modelo de Ley de Potencia de la solución polimérica*



## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 25**

*Ajuste al modelo de Ley de Potencia de la solución gelificante polimérico*



La Figura 26 muestran un comparativo del comportamiento de la viscosidad entre el polímero y la solución gelificante en función de la velocidad de cizallamiento. La viscosidad del polímero inicia con un valor de 361.35  $mPa \cdot s$  y es significativamente mayor a la viscosidad de la solución gelificante, la cual inicia con un valor de 210.91  $mPa \cdot s$ . Esta diferencia se debe principalmente a las características y propiedades estructurales del polímero base (HPAM) y al efecto del retardante (KCl).

La solución polimérica está compuesta por una mezcla de poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM) de alto y bajo peso molecular, donde el componente de alto peso molecular tiene un mayor impacto en la viscosidad por su capacidad de formar cadenas más largas, estructuras extendidas y resistentes al flujo. Además, el HPAM es el resultado de la hidrólisis parcial de la poliacrilamida (PAM) y cuyo proceso convierte los grupos amidas ( $CONH_2$ ) presentes en la cadena polimérica en grupos carboxilo ( $COO_2$ ). Este cambio químico, introduce nuevas cargas negativas a lo largo de la cadena del polímero, lo que genera repulsiones

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

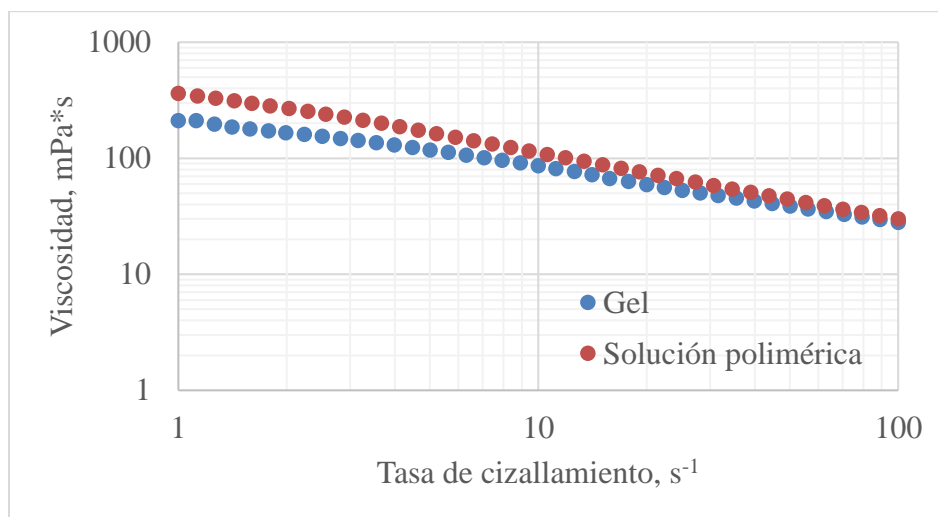
electrostáticas entre las mismas moléculas del HPAM y así mismo, induciendo el estiramiento de la cadena en la solución acuosa y contribuyendo al aumento considerable de su viscosidad (Al-Hamairi & AlAmeri, 2020; Oliveira et al., 2019; Sheng, 2013).

Por otro lado, cuando se agrega PEI se inicia un proceso de interacción química donde las aminas primarias y secundarias de la PEI reaccionan con los grupos funcionales del ácido carboxílico presentes en el HPAM. Esta reacción genera nuevos enlaces químicos covalentes que actúan como puntos de conexión entre las cadenas poliméricas para posteriormente, la formación de una red tridimensional (gel) con propiedades viscoelásticas y rígidas. Este entrecruzamiento restringe la movilidad de las cadenas y, en consecuencia, incrementa la viscosidad del sistema (Jia et al., 2012). Sin embargo, a este sistema de gel polimérico se le agregó una sal, KCl, con el fin de prolongar el tiempo de gelificación. Por ende, la adición de sales inorgánicas provoca el apantallamiento de cargas, es decir, los iones de  $K^+$  neutraliza las cargas negativas de los grupos carboxilatos ( $-COO^-$ ) presentes en la cadena del HPAM y como consecuencia disminuye la repulsión electrostática y su vez, provoca que la cadena se enrolle o se encoja provocando una reducción de su radio hidrodinámico y afecte negativamente sus capacidades espesantes reduciendo significativamente su viscosidad (Afolabi et al., 2022).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 26**

*Comparación del comportamiento reológico de los fluidos*



### 4.2. Fase 2: Pruebas de desplazamientos

Comprender la reología tanto de la solución polimérica como la del gel en el medio poroso es fundamental, ya que su respuesta puede variar de acuerdo a la geometría y distribución de las gargantas porales por donde entra y sale el fluido. En esta investigación se realizaron dos pruebas de desplazamientos, una para cada fluido, donde se ensamblaron dos empaques de arena con un área transversal  $11.10 \text{ cm}^2$  con porosidades de 30.21% y 30.27% y permeabilidades de 1196.1 mD y 1187.98 mD respectivamente.

Se inyectaron 1.5 volúmenes porosos (VP) de solución polimérica a tasas de flujo entre 0.8 y  $10 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Se registraron los perfiles de caídas de presión hasta conseguir la estabilidad y mediante la ecuación de Darcy se calculó la viscosidad aparente del fluido en el medio poroso. Los resultados se consignaron en la Tabla 8.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Tabla 8***Tasas de inyección de la solución polimérica*

<b>Tasa de inyección, cm<sup>3</sup>/min</b>	<b>Diferencial de presión, psi</b>	<b>Viscosidad aparente, mPa*s</b>
<b>0.8</b>	7.26	37.349
<b>1</b>	8.70	35.806
<b>1.5</b>	12.91	35.422
<b>3</b>	27.4	37.589
<b>5</b>	45.8	37.699
<b>7</b>	64.28	37.793
<b>10</b>	92.40	38.028

En el caso del gel, no se pudo mantener el mismo rango de tasas de inyección de la solución polimérica, debido a que la solución gelificante, al presentar una estructura más compleja, genera una mayor resistencia al flujo y ocasiona bloqueos parciales en el medio poroso (Al-Ibadi & Civan, 2012). Bajo esta premisa, la literatura recomienda iniciar con tasas de inyección altas; en este estudio se emplearon tasas de flujo entre 1 y 20 cm<sup>3</sup>/min y se registraron los resultados en la Tabla 9.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Tabla 9***Tasas de inyección de la solución gelificante*

<b>Tasa de inyección, cm<sup>3</sup>/min</b>	<b>Diferencial de presión, psi</b>	<b>Viscosidad aparente, mPa*s</b>
<b>1</b>	143.5	586
<b>1.5</b>	64.1	174.50
<b>3</b>	50.21	68.34
<b>5</b>	106.92	87.32
<b>7</b>	156.64	91.38
<b>10</b>	235.7	96.25
<b>15</b>	498.1	135.60
<b>20</b>	631.5	128.94

La Figura 27 muestra la relación entre la viscosidad aparente con la velocidad de flujo de la solución polimérica, en la cual, se observan diferentes regímenes reológicos aparentes.

A bajas tasas de inyección, la solución polimérica exhibe valores altos de viscosidad que disminuyen progresivamente a medida que incrementa la tasa de inyección, lo que refleja un comportamiento pseudoplástico (*shear-thinning*). Este efecto podría atribuirse a la contribución de las fracciones de alto peso molecular, ya que las cadenas de polímero más largas tienden a enredarse con más facilidad y ofrecer una mayor resistencia al flujo (Seright et al., 2011). Asimismo, a bajas tasas de inyección, el polímero se mueve lentamente y le proporciona más tiempo a la interacción roca - fluido para que ocurran fenómenos como la adsorción en la superficie de los granos y contribuyan a dicha disminución en la viscosidad (López et al., 2003).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Sin embargo, en este estudio no fue posible realizar mediciones de adsorción para comprobar dicha hipótesis y cuantificar cuál sería su impacto real en la viscosidad.

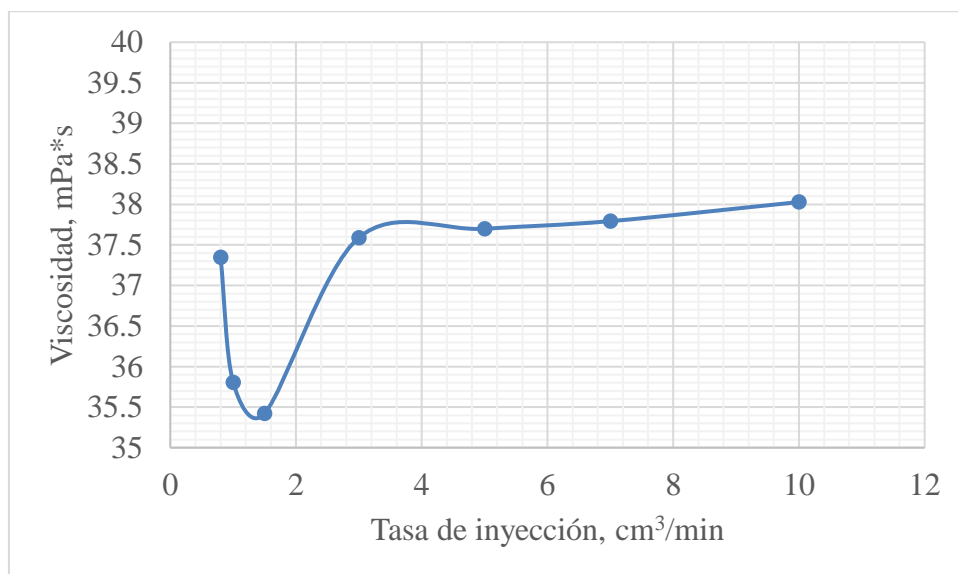
En caso de altas tasas de inyección, (superiores a  $1.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ ), el flujo se vuelve menos pseudoplástico y la viscosidad aparente aumenta ligeramente. Este incremento es característico de un comportamiento dilatante (*shear thickening*) y puede asociarse a efectos viscoelásticos y elongacionales. En un medio poroso, el flujo del polímero no avanza de manera uniforme, sino que atraviesa canales de poros y gargantas de diferentes tamaños, formas irregulares, tortuosidad y conectividad compleja. Esta geometría irregular genera zonas de contracción y expansión sucesivas en el flujo. A altas tasas de inyección, estas variaciones provocan que el fluido se acelere y se frene de manera repentina, lo que induce a que las cadenas de moléculas del poliméricas se estiren y se enrollen, por consiguiente, no alcanzan a relajarse por completo para volver a su estado inicial. Este comportamiento se traduce en mayores caídas de presión y por ende en un incremento en la viscosidad aparente (López et al., 2003; Sochi, 2010; Tahir et al., 2020).

Finalmente, este comportamiento del polímero se corroboró mediante el cálculo del índice de flujo ( $n$ ) en el medio poroso, obtenido mediante análisis de regresión de los datos experimentales de viscosidad aparente versus la velocidad de flujo en escala log-log. El valor resultante de  $n=1.019$  corresponde a una respuesta típica de un fluido dilatante o espesante por cizallamiento, la cual concuerda con la tendencia observada a altas tasas de inyección (Mezger, T. G. 2018).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 27**

*Comportamiento de la viscosidad de la solución polimérica HPAM vs tasa de inyección*



En el caso del comportamiento del gel, al ser una estructura más compleja y con capacidades de bloqueo, genera una mayor resistencia de flujo desde el inicio. Como se observa en la Figura 28, el incremento de la viscosidad a bajas tasas de inyección ( $1 \text{ cm}^3/\text{min}$ ) puede asociarse con la presencia de acumulaciones de gel en las gargantas de los poros causadas por un flujo lento y un mayor tiempo de interacción entre el medio y el fluido, provocando bloqueos parciales que restringen el flujo y generan caídas de presión significativas (Al-Ibadi & Civan, 2012; Chauveteau, 1986). Sin embargo, en un rango de tasas entre  $1$  y  $3 \text{ cm}^3/\text{min}$ , la viscosidad disminuyó al aumentar la velocidad de inyección y, por lo tanto, muestra un comportamiento pseudoplástico, el cual se asocia al desenredamiento de las cadenas poliméricas en la dirección de flujo. Este fenómeno reduce las interacciones moleculares y la resistencia al movimiento del fluido.

A medida que se incrementa la tasa de inyección (entre  $5$  y  $20 \text{ cm}^3/\text{min}$ ), hay una mayor fuerza de empuje, lo que puede reducir los bloqueos generados previamente. Sin embargo, este

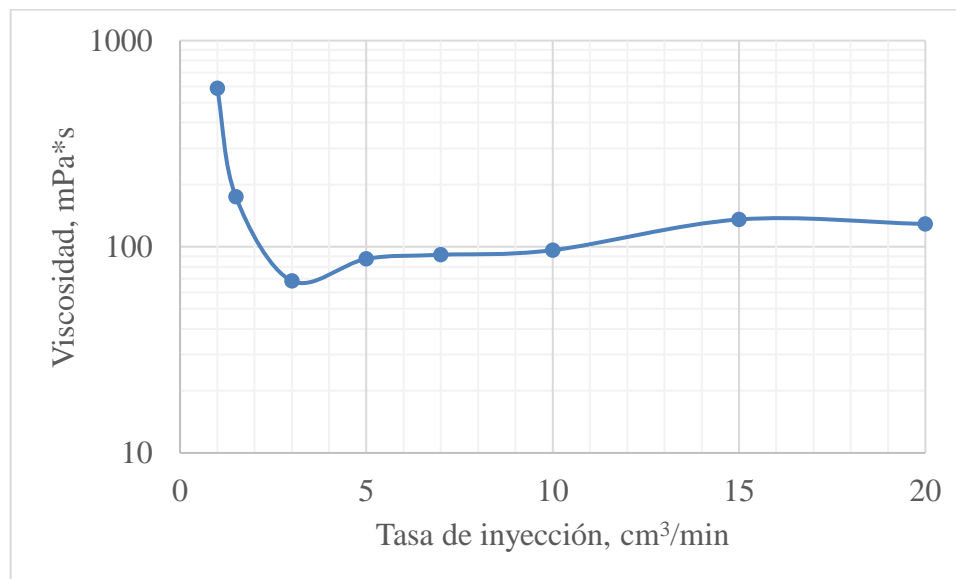
## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

esfuerzo de arrastre también ocasiona que el gel colisione en las gargantas porales aumentando la probabilidad de retención y atrapamiento de las partículas de gel en las paredes de los granos. En consecuencia, aunque el incremento en el diferencial de presión se debe principalmente al mayor volumen inyectado, este efecto adicional contribuye al aumento de la viscosidad aparente.

En comparación con el gel, la solución polimérica generó diferenciales de presión más bajos, principalmente porque la solución polimérica tiene moléculas más flexibles y una fuerte actividad monomolecular, lo que la hace menos capaz de obstruir las gargantas en medios porosos que los geles (Li et al., 2022).

### Figura 28

*Comportamiento de la viscosidad gel polimérico vs tasa de inyección*



### 4.3. Fase 3: Ajuste prueba del reómetro y pruebas de desplazamiento

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

La estructura de un medio poroso presenta una geometría altamente compleja compuesta por poros interconectados de diferentes tamaños y formas. Cuando las moléculas de polímero o gel fluyen a través de estas constricciones, se someten a una serie de expansiones y contracciones, quedando expuestas a esfuerzos de cizallamiento y extensión. Además, se suman otros fenómenos adicionales como la adsorción, el volumen poroso inaccesible y la dispersión, los cuales modifica la dinámica de flujo. Como resultado, las características de transporte en el medio poroso se vuelven más complejas que un sistemas ideal o controlado, lo que dificulta establecer una relación entre el comportamiento reológico en un reómetro con el comportamiento aparente observado en la roca (Shahab, 1990).

Los modelos empíricos son herramientas que permiten predecir el comportamiento de la viscosidad en función de la tasa de cizallamiento. En esta investigación se utilizó una ecuación que calcula la tasa de cizallamiento aparente en el medio poroso que depende tanto de la reología de los fluidos como de las condiciones del medio poroso. Esto con el fin de determinar cuál será el comportamiento de la viscosidad una vez supere los  $100 \text{ s}^{-1}$ .

Los parámetros reológicos se determinaron a partir del modelo de la ley de potencia y se utilizaron como valores de entrada al modelo propuesto por Canella et al. (1980). Cabe destacar que el factor C, es un valor empírico y es una función tanto de la reología del fluido como de la estructura, distribución del tamaño de los poros y tortuosidad del medio (López et al., 2003).

Como se puede observar en la Figura 29, la curva azul representa el comportamiento reológico pseudoplástico de la solución polimérica medido en el reómetro, evidenciando que la viscosidad disminuye progresivamente a medida que aumenta la tasa de cizallamiento, esto debido a la que las moléculas se reorientan y se alinean en la dirección del flujo. Por otro lado, la curva de color verde, corresponde al comportamiento de la viscosidad y el cizallamiento aportado por el

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

medio poroso y consiste en la predicción obtenida a partir de la ecuación de Canella, la cual permitió describir el comportamiento reológico a tasas de cizallamiento superiores a la data disponible obtenida en el reómetro, en este caso, valores superiores a los  $100 \text{ s}^{-1}$ . Asimismo, implementa un factor de escala (C) en la velocidad de cizallamiento del medio poroso para que las predicciones coincidan o se ajusten con la viscosidad real obtenida en el reómetro, de lo contrario sobreestimaría la viscosidad.

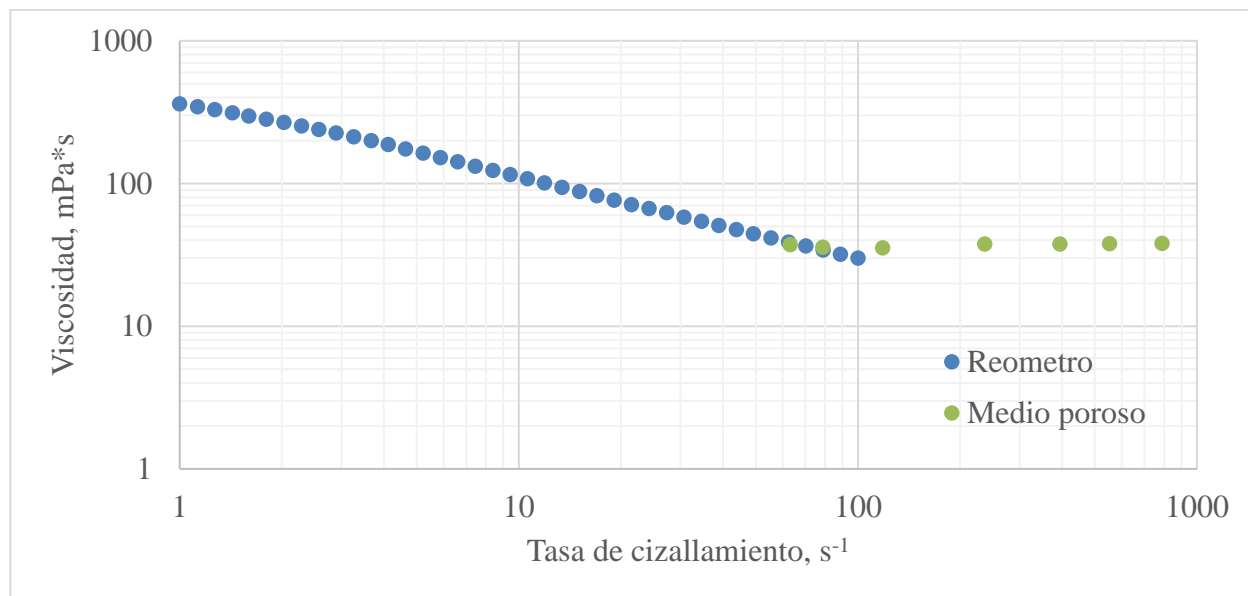
Bajo las condiciones de esta investigación, el factor que mejor se ajusta con los datos experimentales obtenidos para la solución polimérica es de  $C=3.9$ . Dicho valor, se encuentra dentro del rango de 1 a 15, reportado por otros autores en la literatura (Amiri et al., 2024; Sorbie et al., 1989). A bajas tasas de inyección en el medio poroso, la viscosidad aparente mostró coincidencia con la medida en el reómetro a tasas de cizallamiento entre  $63$  y  $79 \text{ s}^{-1}$  y, a su vez, manteniendo un comportamiento pseudoplástico. No obstante, a tasas de cizallamiento más altas, la tendencia de la viscosidad es en pequeños incrementos buscando una estabilización. Esto puede asociarse a efectos elongacionales dentro del medio poroso, que no están presentes en el reómetro. Además, más allá de una velocidad de cizallamiento excesivamente alta, las moléculas de polímero podrían volverse susceptibles a la degradación mecánica.

Estos resultados descartan hipótesis como la de la capa de agotamiento (*depletion layer*), la cual sugiere que la viscosidad del polímero en medios porosos es menor que la medida en un viscosímetro, debido a la suposición de que la concentración de polímero cerca de las paredes del poro es menor que en una solución in situ (Seright & Wang, 2023).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 29**

*Correlación de los datos del reómetro con las pruebas de desplazamiento de la solución polimérica*



Los valores de las tasas de cizallamiento aparentes calculados para la inyección de la solución polimérica una vez se determinó el valor de C, se tabularon en la Tabla 10.

**Tabla 10**

*Tasa de cizallamiento aparente de la solución polimérica*

Tasa de inyección,	Viscosidad	Tasa de cizallamiento
cm <sup>3</sup> /min	aparente, mPa*s	aparente, s <sup>-1</sup>
<b>0.8</b>	37.349	63.11
<b>1</b>	35.806	78.69
<b>1.5</b>	35.422	118.33
<b>3</b>	37.589	236.66

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

<b>5</b>	37.699	394.43
<b>7</b>	37.793	552.21
<b>10</b>	38.028	788.87

---

En la Figura 30 se observa que la reología del gel en el medio poroso difiere significativamente de la medida en el reómetro. Aunque el factor de corrección que mejor aproximó ambos comportamientos fue de  $C=0.3$ , este únicamente permitió ajustar un solo punto (tasa de  $3 \text{ cm}^3/\text{min}$ ). Esta discrepancia confirma lo expuesto en la literatura, donde el comportamiento de la viscosidad del gel en el medio poroso es superior a las medidas en el equipo gracias a la formación de un régimen de flujo extensional, en el cual, las moléculas de gel experimentan un estiramiento al atravesar por las diferentes restricciones, lo que genera un incremento en la resistencia al flujo.

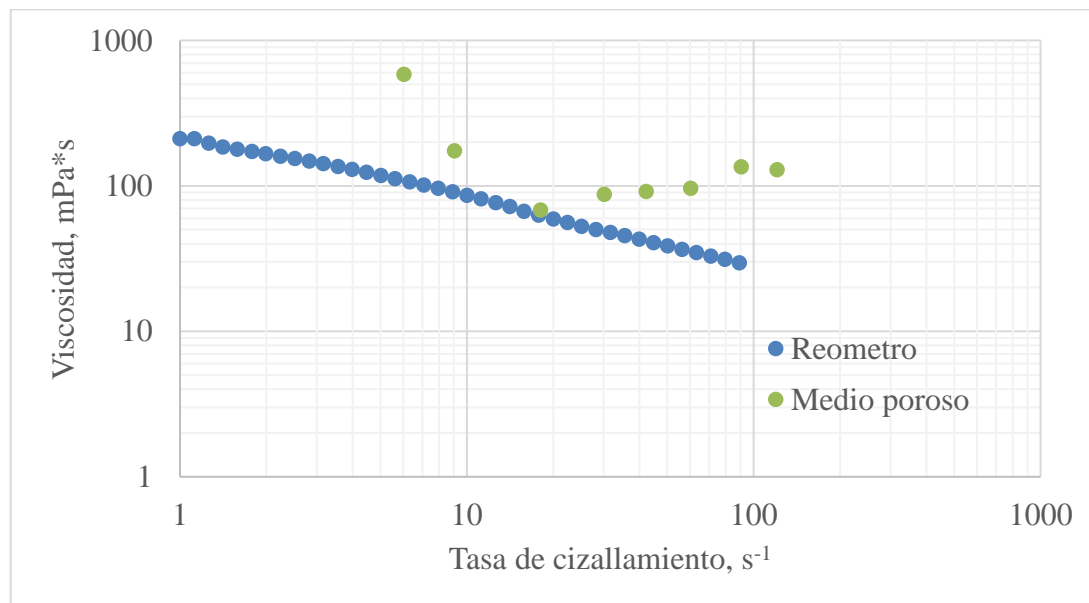
Mientras que en el reómetro la solución gelificante muestra un comportamiento típicamente reofluidizante, con una disminución progresiva de la viscosidad al aumentar la tasa de cizallamiento, en el medio poroso, a bajas tasas de cizallamiento, la viscosidad aparente se mantiene mucho más elevada, aunque también tiende a disminuir con el aumento del cizallamiento hasta cierto punto. Este comportamiento puede explicarse porque el bajo cizallamiento no es suficiente para inducir la alineación de las cadenas poliméricas entrecruzadas con el flujo, lo que favorece las interacciones intermoleculares y mantienen la red de gel en un estado más desordenado y compacto. Adicionalmente, el atrapamiento parcial de agregados o acumulaciones de gel en los canales de flujo del medio poroso, generan bloqueos locales y, en consecuencia, aumentan el diferencial de presión con el tiempo y por ende la viscosidad (Cannella et al., 1988; Collini et al., 2018).

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Al aumentar la tasa de cizallamiento, la viscosidad aparente se mantiene elevada en comparación con la medida en el reómetro, característico de un comportamiento reológico dilatante. Esto puede explicarse como resultado de una posible interrupción o desorganización de las estructuras del gel que se está formando y que está circulando por las gargantas porales estrechas bajo condiciones de flujo elevado. Dichas partículas tiendan a depositarse o absorberse en la superficie de las gargantas más estrechas, reduciendo el diámetro efectivo y contribuyendo al incremento de la viscosidad. Además, puede modificar la cinética de la gelificación dinámica afectando tanto la resistencia final como la forma en la que el gel se distribuye en el medio poroso (Yu et al., 2022).

### Figura 30

*Correlación de los datos del reómetro con las pruebas de desplazamiento de la solución gelificante*



## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Los valores de las tasas de cizallamiento aparentes calculados para la inyección de la solución gelificante una vez se determinó el valor de C, se tabularon en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Tasa de cizallamiento aparente de la solución gelificante*

<b>Tasa de inyección,</b>	<b>Viscosidad</b>	<b>Tasa de cizallamiento</b>
<b>cm<sup>3</sup>/min</b>	<b>aparente, mPa*s</b>	<b>aparente, s<sup>-1</sup></b>
<b>1</b>	586.006	6.03
<b>1.5</b>	174.508	9.04
<b>3</b>	68.347	18.08
<b>5</b>	87.325	30.14
<b>7</b>	91.380	42.19
<b>10</b>	96.252	60.27
<b>15</b>	135.605	90.41
<b>20</b>	128.941	120.54

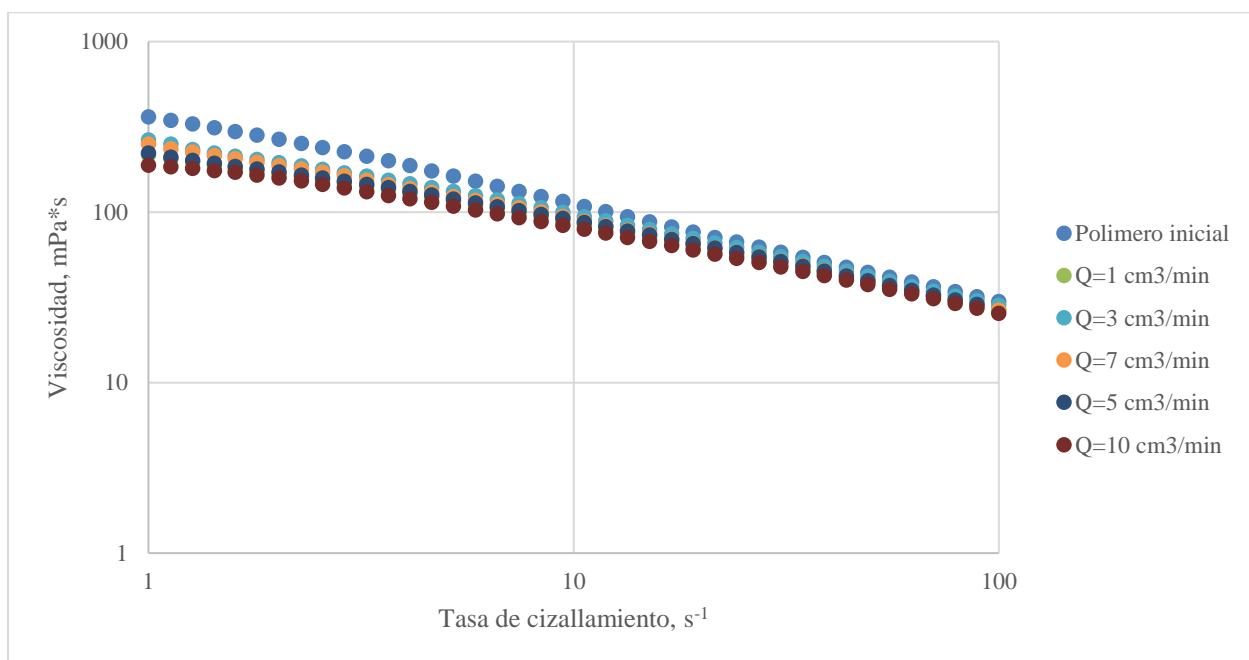
Adicionalmente, se realizó un estudio reológico de los efluentes de la solución polimérica y del gel obtenidos en las pruebas de desplazamiento a diferentes tasas de inyección. Con el fin de comparar el efecto del cizallamiento ejercido por el medio poroso. En las Figura 31 y Figura 32 todas las curvas presentan una disminución de la viscosidad en comparación con la solución gelificante inicial. Sin embargo, entre las diferentes tasas evaluadas no mostraron diferencias significativas con respecto al fluido inicial, por lo que la degradación mecánica del polímero resultó insignificante. Tomando como referencia una tasa de cizallamiento de  $100 \text{ s}^{-1}$ , los valores de viscosidad de ambos fluidos, a tasas superiores a  $3 \text{ cm}^3/\text{min}$ , la viscosidad se encuentran en un

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

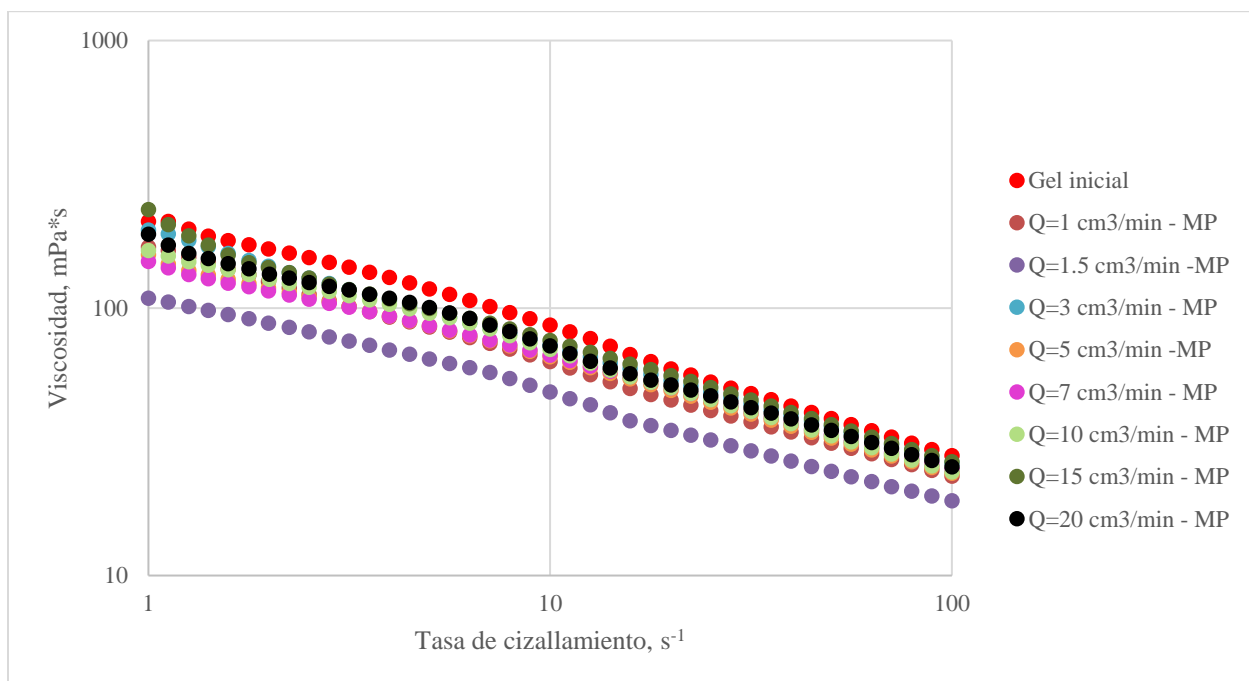
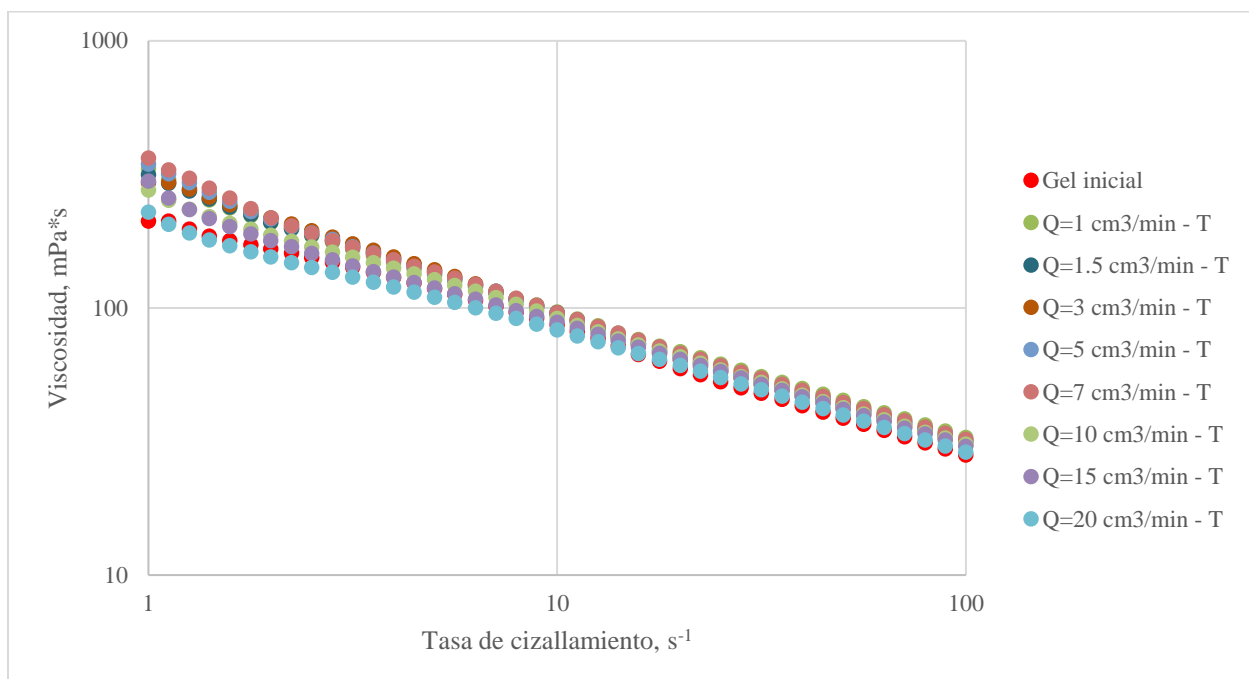
rango entre 24 y 25 mPa\*s, lo que indica que incrementar el caudal no va reducir significativamente más la viscosidad, pero si aumentan los gradientes de presión y el riesgo de fracturamiento.

**Figura 31**

*Reología de los efluentes de la solución polimérica en el medio poroso*



## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Figura 32***Reología de los efluentes de la solución gelificante en el medio poroso***Figura 33***Reología de los efluentes de la solución gelificante en la línea de inyección o tubería*

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Finalmente, además de analizar el cizallamiento en el medio poroso en el gel, se analiza el efecto del cizallamiento ejercido por la línea de inyección. En este sistema, el flujo del fluido es relativamente uniforme y con paredes lisas. Como se observa en la Figura 33, el esfuerzo de cizallamiento es controlado, por ende, no es suficiente para degradar la estructura y disminuir su viscosidad considerablemente. Por otro lado, se evidencia también que las viscosidades son mayores a los efluentes que pasan por el medio poroso. Esto debido al efecto de la temperatura, ya que las líneas están a temperatura ambiente, lo cual mantiene la solución gelificante más rígida y estable por mayor tiempo. El incremento de la temperatura, tal es el caso del medio poroso ( $65^{\circ}\text{C}$ ), acelera el inicio de la gelificación, pero al mismo tiempo favorece la reducción de la viscosidad final.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### 5. Conclusiones

La selección de la formulación gelificante más favorable permitió definir una composición capaz de cumplir con las restricciones operacionales del yacimiento, principalmente el control de viscosidad y un tiempo de gelificación de 10 horas. Tras la evaluación y ejecución de una matriz experimental, una mezcla polimérica de 10000 ppm, una relación polímero-entrecruzador (PEI) 4:1 y una relación polímero-retardante (KCl) 1:1.

La solución polimérica y el gel son fluidos que exhiben un comportamiento reológico reofluidizante en el reómetro. Sin embargo, en los medios porosos, la complejidad del flujo modifica su respuesta. El polímero tiende a un ligero incremento de viscosidad y a una posterior estabilización, semejándose a un comportamiento newtoniano, mientras que el gel, se evidenció un comportamiento dilatante aparente, donde la viscosidad incrementó conforme la tasa de cizallamiento aumentaba.

El modelo de Canella et al (1988) permitió correlacionar los resultados del reómetro con las pruebas de desplazamiento, evidenciando que, pese a las similitudes petrofísicas de los empaques de arena, el factor de ajuste  $C$  difirió considerablemente entre la solución polimérica (3.9) y el gel (0.3), gracias a las complejidades estructurales de cada fluido, en especial el gel, debido a su red tridimensional y su capacidad de bloqueo en las gargantas porales condicionan el flujo.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

### **6. Recomendaciones**

Evaluar el cambio de las propiedades del medio poroso en la medida que el gel es inyectado, esto con el fin entender cómo el gel modifica el medio poroso.

Medir el tamaño hidrodinámico de las partículas del polímero y del gel mediante la dispersión dinámica de luz (DLS) y compararlo con la distribución del tamaño y garganta de poro.

Complementar el estudio reológico con la incorporación de la reología oscilatoria, ya que esta permitiría conocer y entender a profundidad la estructura interna y la capacidad del gel para resistir deformaciones similares a las que puede experimentar al fluir a través de un medio poroso.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

## Referencias bibliográficas

- Afolabi, F., Mahmood, S. M., Yekeen, N., Akbari, S., & Sharifigaliuk, H. (2022). Polymeric surfactants for enhanced oil recovery: A review of recent progress. In *Journal of Petroleum Science and Engineering* (Vol. 208). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109358>
- Airiau, C., & Bottaro, A. (2020). Flow of shear-thinning fluids through porous media. *Advances in Water Resources*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103658>
- Alkadem, M. A., Sharma, H. K., Benedek, L., & Albaharna, Z. A. (2024). Water Shut-Off Best Practices and Analysis of Effectiveness and Sustainability. *Society of Petroleum Engineers - SPE Water Lifecycle Management Conference and Exhibition, WLMC 2024*. <https://doi.org/10.2118/219051-MS>
- Al-Muntasheri, G. A., Nasr-El-Din, H. A., Al-Noaimi, K. R., & Zitha, P. J. J. (2007). A Study of Polyacrylamide-Based Gels Crosslinked With Polyethyleneimine. *International Symposium on Oilfield Chemistry*, 1–9.
- American Petroleum Institute. (1990). *Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations*.
- Amir, Z., Saaid, I. M., Jan, B. M., Patah, M. F. A., Khalil, M., & Bakar, W. Z. W. (2022). PAM/PEI polymer gel for water control in high-temperature and high-pressure conditions: Core flooding with crossflow effect. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 39(3), 605–615. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-1006-y>

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

- Amir, Z., Saaid, I. M., Mohd Junaidi, M. U., & Wan Bakar, W. Z. (2022). Weakened PAM/PEI Polymer Gel for Oilfield Water Control: Remedy with Silica Nanoparticles. *Gels*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/gels8050265>
- Amir, Z., Said, I. M., & Jan, B. M. (2019). In situ organically cross-linked polymer gel for high-temperature reservoir conformance control: A review. In *Polymers for Advanced Technologies* (Vol. 30, Issue 1, pp. 13–39). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/pat.4455>
- Amiri, M., Qajar, J., Raeini, A. Q., & Raouf, A. (2024). Assessing Rheology Effects and Pore Space Complexity in Polymer Flow Through Porous Media: A Pore-Scale Simulation Study. *Water Resources Research*, 60(5). <https://doi.org/10.1029/2023WR036125>
- Anton Paar. (n.d.). *Rheological Measurements of Lubricants at High Shear Rates*. [www.anton-paar.com](http://www.anton-paar.com)
- Anton Paar. (2016). *Instruction Manual MCR Series*.
- Bai, L., Shi, C., Tang, K., Xie, H., Yang, S., & Zhu, D. (2023). Study on migration and plugging performance of polymer gel in fractured cores using nuclear magnetic resonance technology. *Geoenergy Science and Engineering*, 227, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211891>
- Berg, S., & van Wunnik, J. (2017). Shear Rate Determination from Pore-Scale Flow Fields. *Transport in Porous Media*, 117(2), 229–246. <https://doi.org/10.1007/s11242-017-0830-3>
- Campbell, G. A., & Spalding, M. A. (2021). *Analyzing and Troubleshooting Single-Screw Extruders (2nd Edition)*.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Cannella, W. J., Huh, C., & Seright, R. S. (1988). *Prediction of Xanthan Rheology in Porous Media*.

Chandra, A., Singh, A. A., Prasad, S., Andersson, M. R., & Gedefaw, D. (2025). Crosslinking Approaches for Polyethylene Imine (PEI) and Its Uses in Adsorption of Heavy Metals, Dyes, and Carbon Dioxide. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/app15094767>

Chauveteau, G. (1982a). Rodlike Polymer Solution Flow through Fine Pores: Influence of Pore Size on Rheological Behavior. *Journal of Rheology*, 26(2), 111–142. <https://doi.org/10.1122/1.549660>

Chauveteau, G. (1982b). Rodlike Polymer Solution Flow through Fine Pores: Influence of Pore Size on Rheological Behavior. *Journal of Rheology*, 26(2), 111–142. <https://doi.org/10.1122/1.549660>

Chauveteau, G. (1986). *Fundamental Criteria in Polymer Flow Through Porous Media* (pp. 227–267). <https://doi.org/10.1021/ba-1986-0213.ch014>

Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (2008). *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology*.

Collini, H., Mohr, M., Luckham, P., Shan, J., & Russell, A. (2018). The effects of polymer concentration, shear rate and temperature on the gelation time of aqueous Silica-Poly(ethylene-oxide) “Shake-gels.” *Journal of Colloid and Interface Science*, 517, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.01.094>

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Davies, G. A., & Stokes, J. R. (2008). Thin film and high shear rheology of multiphase complex fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 148(1–3), 73–87. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2007.04.013>

Deshpande, A. P., Krishnan, J. M., & Kumar, P. B. S. (2010). Rheology of complex fluids. In *Rheology of Complex Fluids*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6494-6>

Duda, J. L., Hang, S.-A., & Klaus, E. E. (1983). Flow of Polymer Solutions in Porous Media: Inadequacy of the Capillary Model. In *Ind. Eng. Chem. Fundam* (Vol. 22).

Eberhard, U., Seybold, H. J., Floriancic, M., Bertsch, P., Jiménez-Martínez, J., Andrade, J. S., & Holzner, M. (2019). Determination of the effective viscosity of non-Newtonian fluids flowing through porous media. *Frontiers in Physics*, 7(MAY). <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00071>

El Karsani, K. S. M., Al-Muntasheri, G. A., Sultan, A. S., & Hussein, I. A. (2014). Impact of salts on polyacrylamide hydrolysis and gelation: New insights. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(23). <https://doi.org/10.1002/app.41185>

Eley, R. R. (2012). *Rheology and Viscometry*.

El-Karsani, K. S. M., Al-Muntasheri, G. A., Sultan, A. S., & Hussein, I. A. (2015). Gelation of a water-shutoff gel at high pressure and high temperature: Rheological investigation. *SPE Journal*, 20(5), 1103–1112. <https://doi.org/10.2118/173185-PA>

Ghriga, M. A., Gareche, M., Khodja, M., Andreu, N., Lebouachera, S. E. I., Khoukh, A., Drouiche, N., & Grassl, B. (2020). Structure–property relationships of the thermal gelation of partially

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

- hydrolyzed polyacrylamide/polyethylenimine mixtures in a semidilute regime. *Polymer Bulletin*, 77(3), 1465–1488. <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02817-9>
- Giancontieri, G., Hargreaves, D. M., Partal, P., & Lo Presti, D. (2024). Unlocking the Dual Helical Ribbon for rotational viscosity measurements of highly heterogeneous fluids. *Materials and Design*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112920>
- Gogarty, W. B. (1967). *Rheological Properties of Pseudoplastic Fluids in Porous Media*. <http://onepetro.org/spejournal/article-pdf/7/02/149/2153026/spe-1566-a.pdf/1>
- Hatzignatiou, D. G., Norris, U. L., & Stavland, A. (2013). Core-scale simulation of polymer flow through porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 108, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.01.001>
- He, H., Wang, Y., Zhang, J., Xu, X., Zhu, Y., & Bai, S. (2015). Comparison of Gelation Behavior and Morphology of Resorcinol–Hexamethylenetetramine–HPAM Gel in Bulk and Porous Media. *Transport in Porous Media*, 109(2), 377–392. <https://doi.org/10.1007/s11242-015-0524-7>
- Howe, A. M., Clarke, A., & Giernalczyk, D. (2015). Flow of concentrated viscoelastic polymer solutions in porous media: Effect of MW and concentration on elastic turbulence onset in various geometries. *Soft Matter*, 11(32), 6419–6431. <https://doi.org/10.1039/c5sm01042j>
- Jia, H., Pu, W. F., Zhao, J. Z., & Jin, F. Y. (2010). Research on the gelation performance of low toxic PEI crosslinking PHPAM gel systems as water shutoff agents in low temperature reservoirs. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(20), 9618–9624. <https://doi.org/10.1021/ie100888q>

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Jia, H., Zhao, J. Z., Jin, F. Y., Pu, W. F., Li, Y. M., Li, K. X., & Li, J. M. (2012). New insights into the gelation behavior of polyethyleneimine cross-linking partially hydrolyzed polyacrylamide gels. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(38), 12155–12166. <https://doi.org/10.1021/ie301818f>

Juárez, J. L., Rodríguez, M. R., Montes, J., Trujillo, F. D., Monzón, J., Dupuis, G., & Gaillard, N. (2020). *Conformance Gel Design for High Temperature Reservoirs*. <http://onepetro.org/SPEEURO/proceedings-pdf/20EURO/1-20EURO/D011S003R002/2406358/spe-200640-ms.pdf>

Li, X., Wei, J., Zhao, L., Ni, J., Fu, L., & Wang, J. (2022). Experimental Study on Profile Control of Polymer and Weak Gel Molecules in Porous Media. *Gels*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/gels8080467>

López, X., Valvatne, P. H., & Blunt, M. J. (2003). Predictive network modeling of single-phase non-Newtonian flow in porous media. *Journal of Colloid and Interface Science*, 264(1), 256–265. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00310-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00310-2)

Ma, Q., Shuler, P. J., Aften, C. W., & Tang, Y. (2015). Theoretical studies of hydrolysis and stability of polyacrylamide polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 121, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.08.012>

Mezger, T. G. (2018). *Reología Aplicada. En el camino de la Reología con Joe Flow*. Anton Paar. Austria.

Mokhtari, M., & Ozbayoglu, E. M. (2010). *Laboratory Investigation on Gelation Behavior of Xanthan Crosslinked With Borate Intended to Combat Lost Circulation*.

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

- Moradi-Araghi, A. (1999). A review of thermally stable gels for fluid diversion in petroleum production. In *Journal of Petroleum Science and Engineering* (Vol. 26).  
[www.elsevier.nl/locate/jpetscieng](http://www.elsevier.nl/locate/jpetscieng)
- Morrison, F. A. (2001). *Understanding Rheology*.
- Osswald, T. A., & Román, A. J. (2025). *Understanding Polymer Processing - Processes and Governing Equations (3rd Edition)*.
- Rauwendaal, C. (2014). *Polymer Extrusion (5th Edition)*.
- Robinson, M., & Cleary, P. W. (2012). Flow and mixing performance in helical ribbon mixers. *Chemical Engineering Science*, 84, 382–398. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.08.044>
- Rousseau, D., Chauveteau, G., Renard, M., Tabary, R., & Zaitoun, A. (2005). *Rheology and transport in porous media of new Water Shutoff/Conformance control Microgels*.
- Sairam, P., Morgan, R., & Pangu, G. (2012). *A Combined Mixer Design with Helical Blades to Probe Rheology of Complex Oilfield Slurries and Pastes*.  
<http://onepetro.org/SPETTCE/proceedings-pdf/12TTCE/12TTCE/SPE-159112-MS/1647024/spe-159112-ms.pdf>
- Sakai, Takamasa. (2020). *Physics of polymer gels*. Wiley-VCH.
- Sengupta, B., Sharma, V. P., & Udayabhanu, G. (2012). Gelation studies of an organically cross-linked polyacrylamide water shut-off gel system at different temperatures and pH. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 81, 145–150.  
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.12.016>

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Seright, R. S., Fan, T., Wavrik, K., & Carvalho Balaban, R. (2011). New Insights Into Polymer Rheology in Porous Media. In *SPE Journal* (Vol. 35).

Seright, R. S., & Wang, D. (2023). Polymer flooding: Current status and future directions. In *Petroleum Science* (Vol. 20, Issue 2, pp. 910–921). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.02.002>

Shahab, H. (1990). *An experimental investigation into the flow and rheological behavior of xanthan solutions and a xanthan/Cr(III) gel system in porous media.*

Skauge, A., Zamani, N., Jacobsen, J. G., Shiran, B. S., Al-Shakry, B., & Skauge, T. (2018). Polymer flow in porous media: Relevance to enhanced oil recovery. *Colloids and Interfaces*, 2(3). <https://doi.org/10.3390/colloids2030027>

Skauge, T., Skauge, A., Salmo, I. C., Ormehaug, P. A., Wassing, L. M., Glasbergen, G., Wunnik, J. N. Van, & Masalmeh, S. K. (2016). *Radial and Linear Polymer Flow-Influence on Injectivity.*

Sochi, T. (2010). Non-Newtonian flow in porous media. In *Polymer* (Vol. 51, Issue 22, pp. 5007–5023). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.07.047>

Sorbie, K. S., Clifford, P. J., & Jones, E. R. W. (1989). *The Rheology of Pseudoplastic Fluids in Porous Media Using Network Modeling.*

Spildo, K., & Sæ, E. I. Ø. (2015). Effect of Charge Distribution on the Viscosity and Viscoelastic Properties of Partially Hydrolyzed Polyacrylamide. *Energy and Fuels*, 29(9), 5609–5617. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01066>

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Stavland, A., Jonsbråten, H. C., Lohne, A., Moen, I.; A., & Giske, N. H. (2010). *Polymer Flooding-Flow Properties in Porous Media Versus Rheological Parameters*.

Sydansk, R. D. (1988). *A New Conformance-Improvement-Treatment Chromium(III) Gel Technology*. <http://onepetro.org/SPEIOR/proceedings-pdf/88EOR/All-88EOR/SPE-17329-MS/3220736/spe-17329-ms.pdf/1>

Tahir, M., Hincapie, R. E., & Ganzer, L. (2020). An elongational and shear evaluation of polymer viscoelasticity during flow in porous media. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(12), 1–25. <https://doi.org/10.3390/APP10124152>

Teeuw, D., & Hesselink, F. T. (1980). *Power-Law flow and Hydrodynamic Behaviour of Biopolymer Solutions in Porous Media*. <http://onepetro.org/SPEOCC/proceedings-pdf/80OGC/80OGC/SPE-8982-MS/4120331/spe-8982-ms.pdf/1>

Thomas, F. B. , Bennion, D. B. , Anderson, G. E. , Meldrum, B. T., & Heaven, W. J. (2000). Water Shut-off Treatments—Reduce Water and Accelerate Oil Production. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 39(4), 25–29. [https://doi.org/10.2118/00-04-TN/2164918/petsoc-00-04-tn.pdf?casa\\_token=Y8hbuRW78QQAAAAA:k5Ff02ZABByWR083HxnmVP5SZ-txLz2P9mBVYU9q1f8GBWRDpbFloen1saIY6Y8uPB6gg\\_qf](https://doi.org/10.2118/00-04-TN/2164918/petsoc-00-04-tn.pdf?casa_token=Y8hbuRW78QQAAAAA:k5Ff02ZABByWR083HxnmVP5SZ-txLz2P9mBVYU9q1f8GBWRDpbFloen1saIY6Y8uPB6gg_qf)

Vargas-Vasquez, S. M., Romero-Zerón, L. B., & MacMillan, B. (2009). Analysis of syneresis of HPAM/Cr(II) and HPAm/Cr(III) acetate gels through H nuclear magnetic resonance, bottle testing, and UV-vis spectroscopy. *Petroleum Science and Technology*, 27(15), 1727–1743. <https://doi.org/10.1080/10916460802611564>

Wang, K., Luo, M., Li, M., Gu, X., Li, X., Fan, Q., Pu, C., & Wang, L. (2024). Gelation and Plugging Performance of Low-Concentration Partially Hydrolyzed

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

- Polyacrylamide/Polyethyleneimine System at Moderate Temperature and in Fractured Low-Permeability Reservoir. *Polymers*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/polym16111585>
- White, J. L., Goddard, J. E., & Phillips, H. M. (1973). *Use of Polymers To Control Water Production in Oil Wells*. <http://onepetro.org/JPT/article-pdf/25/02/143/2677850/spe-3672-pa.pdf/1>
- Ya Malkin, Isayev, & Avraam I Contributor. (2005). *Rheology: Concepts, Methods, and Applications*.
- Yadav, U., & Mahto, V. (2013). Rheological study of partially hydrolyzed polyacrylamide-hexamine-pyrocatechol gel system. *International Journal of Industrial Chemistry*, 4(1), 8. <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-8>
- Yi, Q., Li, C., Manlai, Z., Yuli, L., & Ruiquan, L. (2017). Dynamic thickening investigation of the gelation process of PAM/PEI system at high temperature and high pressure. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 38(11), 1640–1646. <https://doi.org/10.1080/01932691.2016.1269652>
- Yu, H., Ma, Z., Tang, L., Li, Y., Shao, X., Tian, Y., Qian, J., Fu, J., Li, D., Wang, L., & Ren, F. (2022). The Effect of Shear Rate on Dynamic Gelation of Phenol Formaldehyde Resin Gel in Porous Media. *Gels*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/gels8030185>
- Zamani, N., Kaufmann, R., Skauge, T., & Skauge, A. (2013). Pore scale modelling of polymer flow. *Saint Petersburg Russia - From Fundamental Science to Deployment: 17th European Symposium on Improved Oil Recovery, IOR*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142607>

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

Zhu, D., Bai, B., & Hou, J. (2017). Polymer Gel Systems for Water Management in High-Temperature Petroleum Reservoirs: A Chemical Review. In *Energy and Fuels* (Vol. 31, Issue 12, pp. 13063–13087). American Chemical Society.

<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02897>

Zhu, D., Hou, J., Wei, Q., Chen, Y., & Peng, K. (2017). *Development of a High-Temperature Resistant Polymer Gel System for Conformance Control in Jidong Oilfield.*

[http://onepetro.org/SPEAPOG/proceedings-pdf/17APOG/1-](http://onepetro.org/SPEAPOG/proceedings-pdf/17APOG/1-17APOG/D012S036R008/1280084/spe-186235-ms.pdf)

[17APOG/D012S036R008/1280084/spe-186235-ms.pdf](http://onepetro.org/SPEAPOG/proceedings-pdf/17APOG/1-17APOG/D012S036R008/1280084/spe-186235-ms.pdf)

Zołek-Tryznowska, Z. (2015). Polymers - Fundamentals and Applications. In *Printing on Polymers: Fundamentals and Applications* (pp. 87–99). Elsevier Inc.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37468-2.00006-3>

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

## Apéndices

A continuación, se tabulan los resultados obtenidos en los monitoreos del tiempo de gelificación de acuerdo al código de Sydanks.

## Apéndice 1

*Códigos de Sydansk gel de 10000 ppm. KCL 2:1, PEI: 2:1*

CONCENTRACIÓN		10000 PPM
RELACIÓN P:R	KCL	2:1
RELACIÓN P:E	PEI	2:1
<b>GEL</b>		
TIEMPO (H)	9/16/2024	CODIGO
0	13:47	A
1	14:47	A
2	15:47	A
3	16:47	A
4	17:47	B
5	18:47	B
6	19:47	B
7	20:47	B
8	21:47	C
9	22:47	D
10	23:47	D
11	0:47	E
12	1:47	G
13	2:47	G
14	3:47	G
24	13:47	G

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

**Apéndice 2**

*Códigos de Sydansk gel de 10000 ppm. KCL 1:1, PEI: 2:1*

CONCENTRACIÓN		10000 PPM
RELACIÓN P:R	KCL	1:1
RELACIÓN P:E	PEI	2:1
GEL		
TIEMPO (H)	9/16/2024	CODIGO
0	14:30	A
1	15:30	A
2	16:30	A
3	17:30	A
4	18:30	A
5	19:30	B
6	20:30	B
7	21:30	B
8	22:30	B
9	23:30	B
10	0:30	C
11	1:30	F
12	2:30	F
13	3:30	F
24	4:30	F

**Apéndice 3**

*Códigos de Sydansk gel (mezcla) de 10000 ppm. KCL 2:1, PEI: 4:1*

CONCENTRACIÓN		10000 PPM
---------------	--	-----------

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

<b>RELACIÓN P:R</b>	<b>KCI</b>	<b>2:1</b>
<b>RELACIÓN P:E</b>	<b>PEI</b>	<b>4:1</b>
<b>GEL</b>		
<b>TIEMPO (H)</b>	<b>9/16/2024</b>	<b>GEL STRENGTH CODE</b>
<b>0</b>	11:44	A
<b>1</b>	12:44	A
<b>2</b>	13:44	A
<b>3</b>	14:44	B
<b>4</b>	15:44	B
<b>5</b>	16:44	B
<b>6</b>	17:44	B
<b>7</b>	18:44	B
<b>8</b>	19:44	B
<b>9</b>	20:44	C
<b>10</b>	21:44	D
<b>11</b>	22:44	D
<b>12</b>	23:44	E
<b>13</b>	06:44	G
<b>24</b>	11:44	G

**Apéndice 4**

*Códigos de Sydansk gel (mezcla) de 10000 ppm. KCL 1:1, PEI: 4:1*

<b>CONCENTRACIÓN</b>		<b>10000 PPM</b>
<b>RELACIÓN P:R</b>	<b>KCI</b>	<b>1:1</b>
<b>RELACIÓN P:E</b>	<b>PEI</b>	<b>4:1</b>

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

<b>GEL</b>		
<b>TIEMPO (H)</b>	<b>9/16/2024</b>	<b>CODIGO</b>
<b>0</b>	12:18	A
<b>1</b>	13:18	A
<b>2</b>	14:18	A
<b>3</b>	15:18	A
<b>4</b>	16:18	A
<b>5</b>	17:18	A
<b>6</b>	18:18	A
<b>7</b>	19:18	B
<b>8</b>	20:18	B
<b>9</b>	21:18	B
<b>10</b>	22:18	B
<b>11</b>	07:18	B
<b>12</b>	08:18	C
<b>13</b>	09:18	F
<b>24</b>	12:18	F

**Apéndice 5**

*Códigos de Sydansk gel de 15000 ppm. KCL 2:1, PEI: 2:1*

<b>CONCENTRACIÓN</b>		
<b>15000 PPM</b>		
<b>RELACIÓN P:R</b>	<b>KCl</b>	<b>2:1</b>
<b>RELACIÓN P:E</b>	<b>PEI</b>	<b>2:1</b>
<b>GEL</b>		

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

<b>TIEMPO (H)</b>	<b>9/16/2024</b>	<b>CODIGO</b>
<b>0</b>	13:47	A
<b>1</b>	14:47	A
<b>2</b>	15:47	A
<b>3</b>	16:47	B
<b>4</b>	17:47	B
<b>5</b>	18:47	B
<b>6</b>	19:47	B
<b>7</b>	20:47	C
<b>8</b>	21:47	D
<b>9</b>	22:47	D
<b>10</b>	23:47	F
<b>11</b>	8:47	G
<b>12</b>	9:47	H
<b>13</b>	10:47	H
<b>24</b>	13:47	H

## Apéndice 6

*Códigos de Sydans gel de 15000 ppm. KCL 1:1, PEI: 2:1*

<b>CONCENTRACIÓN 15000 PPM</b>		
<b>RELACIÓN P:R</b>	<b>KCl</b>	<b>1:1</b>
<b>RELACIÓN P:E</b>	<b>PEI</b>	<b>2:1</b>
<b>GEL</b>		
<b>TIEMPO (H)</b>	<b>9/16/2024</b>	<b>CODIGO</b>

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

<b>0</b>	14:30	A
<b>1</b>	15:30	A
<b>2</b>	16:30	A
<b>3</b>	17:30	A
<b>4</b>	18:30	B
<b>5</b>	19:30	B
<b>6</b>	20:30	B
<b>7</b>	21:30	B
<b>8</b>	22:30	B
<b>9</b>	23:30	C
<b>10</b>	0:30	C
<b>11</b>	9:30	C
<b>12</b>	10:30	F
<b>13</b>	11:30	F
<b>24</b>	14:30	F

## Apéndice 7

*Códigos de Sydans gel de 15000 ppm. KCL 2:1, PEI: 4:1*

CONCENTRACIÓN		15000 PPM
RELACIÓN P:R	KCl	2:1
RELACIÓN P:E	PEI	4:1
<b>GEL</b>		
TIEMPO (H)	9/16/2024	CODIGO
<b>0</b>	11:44	A
<b>1</b>	12:44	A

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

<b>2</b>	13:44	A
<b>3</b>	14:44	B
<b>4</b>	15:44	B
<b>5</b>	16:44	B
<b>6</b>	17:44	B
<b>7</b>	18:44	B
<b>8</b>	19:44	C
<b>9</b>	20:44	D
<b>10</b>	21:44	E
<b>11</b>	06:44	G
<b>12</b>	07:44	G
<b>13</b>	08:44	G
<b>24</b>	11:44	H

**Apéndice 8**

*Códigos de Sydansk gel de 15000 ppm. KCL 1:1, PEI: 4:1*

<b>CONCENTRACIÓN</b>		<b>15000 PPM</b>
<b>RELACIÓN P:R</b>	<b>KCL</b>	<b>1:1</b>
<b>RELACIÓN P:E</b>	<b>PEI</b>	<b>4:1</b>
<b>GEL</b>		
<b>TIEMPO (H)</b>	<b>9/16/2024</b>	<b>CODIGO</b>
<b>0</b>	12:18	A
<b>1</b>	13:18	A
<b>2</b>	14:18	A
<b>3</b>	15:18	A
<b>4</b>	16:18	A

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

<b>5</b>	17:18	A
<b>6</b>	18:18	A
<b>7</b>	19:18	B
<b>8</b>	20:18	B
<b>9</b>	21:18	B
<b>10</b>	22:18	B
<b>11</b>	07:18	C
<b>12</b>	08:18	F
<b>13</b>	09:18	F
<b>24</b>	12:18	F

**Apéndice 9**

*Códigos de Sydansk gel de 20000 ppm. KCL 2:1, PEI: 2:1*

CONCENTRACIÓN		20000 PPM
RELACIÓN P:R	KCl	2:1
RELACIÓN P:E	PEI	2:1
GEL		
TIEMPO (H)	9/16/2024	CODIGO
<b>0</b>	13:47	A
<b>1</b>	14:47	A
<b>2</b>	15:47	A
<b>3</b>	16:47	B
<b>4</b>	17:47	B
<b>5</b>	18:47	B
<b>6</b>	19:47	B
<b>7</b>	20:47	C

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

<b>8</b>	21:47	C
<b>9</b>	22:47	D
<b>10</b>	23:47	D
<b>11</b>	08:47	G
<b>12</b>	09:47	H
<b>13</b>	10:47	H
<b>24</b>	13:47	H

**Apéndice 10**

*Códigos de Sydansk gel de 20000 ppm. KCL 1:1, PEI: 2:1*

<b>CONCENTRACIÓN</b>		<b>20000 PPM</b>
<b>RELACIÓN P:R</b>	<b>KCl</b>	<b>1:1</b>
<b>RELACIÓN P:E</b>	<b>PEI</b>	<b>2:1</b>
<b>GEL</b>		
<b>TIEMPO (H)</b>	<b>9/16/2024</b>	<b>CODIGO</b>
<b>0</b>	14:30	A
<b>1</b>	15:30	A
<b>2</b>	16:30	A
<b>3</b>	17:30	A
<b>4</b>	18:30	A
<b>5</b>	19:30	A
<b>6</b>	20:30	A
<b>7</b>	21:30	B
<b>8</b>	22:30	B
<b>9</b>	23:30	B
<b>10</b>	0:30	C

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

<b>11</b>	09:30	C
<b>12</b>	10:30	E
<b>13</b>	11:30	H
<b>24</b>	14:30	H

## Apéndice 11

*Códigos de Sydansk gel de 20000 ppm. KCL 2:1, PEI: 4:1*

CONCENTRACIÓN		20000 PPM
RELACIÓN P:R	KCL	2:1
RELACIÓN P:E	PEI	4:1
GEL		
TIEMPO (H)	9/16/2024	CODIGO
<b>0</b>	11:44	A
<b>1</b>	12:44	A
<b>2</b>	13:44	A
<b>3</b>	14:44	A
<b>4</b>	15:44	A
<b>5</b>	16:44	B
<b>6</b>	17:44	B
<b>7</b>	18:44	B
<b>8</b>	19:44	C
<b>9</b>	20:44	C
<b>10</b>	21:44	D
<b>11</b>	22:44	E
<b>12</b>	07:44	F
<b>13</b>	08:44	G

## COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN GEL POLIMÉRICO

<b>24</b>	11:44	<b>G</b>
-----------	-------	----------

**Apéndice 12**

*Códigos de Sydansk gel (mezcla) de 20000 ppm. KCL 1:1, PEI: 4:1*

<b>CONCENTRACIÓN</b>		<b>20000 PPM</b>
<b>RELACIÓN P:R</b>	<b>KCI</b>	<b>2:1</b>
<b>RELACIÓN P:E</b>	<b>PEI</b>	<b>4:1</b>
<b>GEL</b>		
<b>TIEMPO (H)</b>	<b>9/16/2024</b>	<b>CODIGO</b>
<b>0</b>	12:18	<b>A</b>
<b>1</b>	13:18	<b>A</b>
<b>2</b>	14:18	<b>A</b>
<b>3</b>	15:18	<b>A</b>
<b>4</b>	16:18	<b>A</b>
<b>5</b>	17:18	<b>A</b>
<b>6</b>	18:18	<b>A</b>
<b>7</b>	19:18	<b>B</b>
<b>8</b>	20:18	<b>B</b>
<b>9</b>	21:18	<b>B</b>
<b>10</b>	22:18	<b>B</b>
<b>11</b>	07:18	<b>C</b>
<b>12</b>	08:18	<b>F</b>
<b>13</b>	09:18	<b>F</b>
<b>24</b>	12:18	<b>F</b>