

Sección de Ingeniería de Petróleos

EFECTO DE LA TEMPERATURA, SALINIDAD Y POTENCIAL HIDROGENO SOBRE LA VISCOSIDAD DE SOLUCIONES DE POLIMEROS PUSHER 500 Y 700

Henry Giraldo Pineda, Ministerio de Minas y Energía
Gonzalo Rojas García, Facultad de Minas
Ramiro Pérez Palacio, Facultad de Minas

RESUMEN

En esta investigación se estudia el efecto que ejerce la temperatura, salinidad y potencial hidrógeno, pH, sobre la viscosidad de las soluciones de polímeros poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas, Pusher 500 y 700, producidos por la compañía Norteamericana Dow Chemical.

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que el efecto que ejerce la temperatura sobre los dos tipos de polímeros es más o menos igual, no importa la concentración o clase de polímero; en todos los casos se obtuvo una disminución en viscosidad aproximadamente del 61.0% al pasar de 78 a 180 °F. La salinidad reduce apreciablemente la viscosidad de las soluciones, siendo mayor en el polímero de más alto peso molecular. A bajos y altos valores de pH, las viscosidades de las soluciones tienden a ser similares; los mayores valores de viscosidad se obtuvieron para un intervalo de pH comprendido entre 7.0 y 11.0; este intervalo no es alterado por la temperatura. El grado de degradación térmica, en ausencia de oxígeno, fue similar para soluciones idénticas de los dos tipos de polímeros usados; tal degradación aumenta a medida que se incrementa la concentración de polímero. Para soluciones de polímeros PPH (poliacrilamida parcialmente hidrolizada) en salmuera al 0.5% por peso, la degradación térmica emplea a 200 °F y se completa a 350 °F.

INTRODUCCION

La industria petrolera ha desarrollado nuevas técnicas de recuperación secundaria y terciaria, con el fin de incrementar el recobro de petróleo remanente en yacimientos que han sido explotados utilizando diferentes procedimientos.

Uno de los métodos de recobro adicional más económico es la inyección de agua. Las eficiencias volumétricas y de desplazamiento que se logran en una invasión con agua son relativamente bajas, dependiendo de la viscosidad del petróleo. Las eficiencias areales de barrido horizontal y vertical y de desplazamiento, y por tanto el recobro de petróleo, aumentan con la disminución de la razón de movilidad, la que puede disminuirse reduciendo la movilidad del petróleo o aumentando la movilidad del fluido desplazante.

Se han realizado varios ensayos usando diferentes aditivos con el fin de aumentar la viscosidad del agua. Los primeros intentos fueron con glicerina, jabones de ácidos grasos, alginatos, sacarosas y otros; estos aditivos aumentan el recobro de petróleo pero se requieren grandes cantidades de ellos para incrementar la viscosidad hasta el nivel deseado, lo cual va en detrimento de la economía del proceso.

Hasta el presente, los polímeros solubles en agua como las poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas, los polisacáridos y los óxidos de polietileno, son lo que han presentado mejores resultados de campo (2, 5, 8, 9)¹. Pequeñas cantidades de ellos aumentan la viscosidad del agua y también, algunos, reducen la permeabilidad efectiva al agua detrás del frente de invasión.

El objetivo principal de esta investigación es el estudiar el efecto que ejerce la temperatura, salinidad y potencial hidrógeno, pH, sobre la viscosidad de las soluciones de polímeros poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas, Pusher 500 y 700.

APARATOS, MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Aparatos y Materiales.

Todas las medidas de viscosidad cinemática se realizaron con viscosímetros Cannon-Fenske (Ostwald Modificado). El equipo² utilizado para este caso consta de un recipiente de vidrio para el baño, termostato, termómetro y regulador de temperatura.

Se empleó agua para el baño en todas las medidas de viscosidad que se realizaron.

Los polímeros utilizados en esta investigación, Pusher 700 y 500, fueron suministrados por la Dow Chemical Co.³, con las siguientes características:

Polímero	Peso Molecular	Grado de Hidrólisis
Pusher 700	3-7 millones, lb/lb-mol	Moderada (20-40%)
Pusher 500	2-3 millones, lb/lb-mol	Moderada (20-40%)

El Pusher 700 usado en las pruebas es el mismo empleado por Ecopetrol en un proyecto de recuperación secundaria.

Los polímeros fueron disueltos en agua destilada o en salmuera, por agitación suave durante varias horas en un agitador magnético, hasta obtener una solución

(1) Referencias al final del trabajo.

(2) Precision Scientific Co., Chicago, Illinois, U.S.A.

(3) Dow Chemical Co., Western Division Research Laboratories, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A.

homogénea. Posteriormente se filtraron las soluciones a través de un embudo de vidrio filtrador⁴ con un disco poroso de 40-60 micrones de tamaño del poro.

El pH de la solución de polímeros se variaba añadiendo HCl o NaOH. Para la medida del pH se utilizó un medidor eléctrico de potencial hidrógeno⁵

Para el estudio de la degradación térmica se utilizó una celda (recipiente) de acero inoxidable con una bomba de vidrio (esquema con dimensiones en Fig. 1) La celda fue acondicionada a partir del equipo para el ensayo ASTM D-525 TP-40, estabilidad de oxidación de la gasolina (método periódico de inducción). La celda está constituida de aleación de acero al 18% de cromo y 8% de níquel, conforme a la especificación ASTM A-240, grado S, tipo 304. El envase de vidrio con su tapa está hecho de vidrio Pyrex. La parte interna de la celda se recubrió con una capa muy fina de teflón para evitar el contacto del vapor de la solución de polímero con el acero.

El calentamiento de la solución de polímeros en la celda se realizó en un baño de aire dentro de un horno⁶ con plato giratorio.

2. Procedimiento Experimental.

Los polímeros fueron disueltos en agua destilada o en salmuera mediante el mínimo grado de agitación para evitar el degradamiento mecánico de las grandes cadenas de moléculas del polímero. Cloruro de sodio fue agregado al agua destilada hasta lograr la concentración de sal deseada del solvente. La técnica seguida para la preparación de la solución de polímeros es la sugerida por la Dow Chemical (3).

Las soluciones se agitaron durante varias horas y se prepararon con 2 ó 3 días de anticipación a la realización de las pruebas. Debido a la falta de Filtro Miliporo o Filtro Cerámico Selas XF, para la filtración de la solución, se usó un embudo de vidrio con disco poroso de alúmina con un tamaño de poros de 40-60 micrones.

Como no se agregó bactericida a la solución de polímeros, cuando ésta tenía más de una semana de preparada se descartaba. Sin embargo, de acuerdo a los resultados de Bruce (1), la degradación en una semana es mínima, y según Schurz (10), la degradación que provoca el aire natural en soluciones de polímeros almacenadas en recipientes de vidrio a temperatura ambiente y para tiempos cortos, es despreciable.

(4) Embudo de vidrio filtrador, tamaño del poro 40-60 micrones, tipo G, 150 ml., Thomas Scientific Apparatus, Philadelphia, P.A., U.S.A.

(5) 76004 Expandomatic pH Meter, Beckman Instruments, Inc. Fullerton, California 92634, U.S.A.

(6) Horno, Gravity Convection Model 303, Precision Scientific Co. Chicago, Illinois, U.S.A.

Las medidas de viscosidad cinemática de las soluciones de polímeros fueron realizadas en base al ensayo ASTM D-445 y a temperaturas de 78, 100, 130 y 180 °F. La temperatura de la solución se variaba incrementando la temperatura del baño de agua hasta el valor correspondiente y controlándola por medio del termoregulador.

Para el estudio de la influencia de la temperatura sobre la viscosidad de las soluciones de los dos tipos de polímeros, P-700 y P-500, en agua destilada, se utilizaron soluciones a concentraciones de 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 1000 ppm. Para los demás ensayos se usaron solamente soluciones con concentraciones de 200, 500 y 1000 ppm. de polímero.

Para analizar el efecto combinado del NaCl y la temperatura, se usaron soluciones de polímeros en salmuera al 0.2, 0.5, 1.0 y 2.0% por peso, a las cuales se les midió la viscosidad para los diferentes valores de temperatura escogidos. La preparación de las soluciones de polímeros a distintos porcentajes de NaCl se efectuó agregando polímero a las salmueras correspondientes.

La preparación de las soluciones a distintos valores de pH se efectuó tomando la solución de polímero original preparada en salmuera al 0.5% por peso y se dividió en porciones a las cuales se les añadió ácido o base para obtener soluciones con los valores de pH requeridos. Se usó HCl y NaOH de alta concentración para evitar la variación de viscosidad de la solución por incremento excesivo de su volumen.

Los calentamientos correspondientes al estudio de la degradación térmica del polímero en ausencia de oxígeno, fueron realizados a 130, 230, 300 y 350 °F durante un tiempo de 48 horas. El calentamiento a 130 °F se hizo en el baño de agua que sirve para medir la viscosidad cinemática, dejando la solución de polímeros dentro del viscosímetro. Los demás calentamientos se hicieron colocando la celda de acero inoxidable con la solución dentro de un baño de aire en el horno. Antes y después del calentamiento, la solución se pesaba para verificar que no hubiera perdida por escape de vapores. Si resultaba con pérdidas, se repetía el calentamiento. Despues se medía la viscosidad a temperatura de 78 a 100 °F y se comparaba con el valor que tenía antes del calentamiento para obtener el grado de degradación térmica que sufría la solución del polímero.

El calentamiento a diversas temperaturas se realizó para porciones distintas de una misma clase de solución de polímero; o sea, una porción ya calentada o degradada no se volvió a usar para llevarla a otra temperatura.

DISCUSION DE RESULTADOS

1. Influencia de la Temperatura Sobre la Viscosidad.

De las Figs. 2 y 4 se observa que el efecto de la concentración sobre la viscosidad de las soluciones de polímeros poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas, P-700 y P-500, en agua destilada, es una variación exponencial suave. La viscosidad aumenta a medida que incrementa la concentración del polímero a temperatura constante.

Este aumento en viscosidad se hace menos notorio a temperaturas elevadas. Para una misma temperatura e igual concentración de polímero, resulta más viscosa la solución de P-700 que la de P-500, por lo cual se comprueba que al aumentar el peso molecular del polímero se produce un incremento en la viscosidad de la solución.

De lo anterior se puede decir que, para una misma temperatura la viscosidad de las soluciones es dependiente de la concentración y del peso molecular.

De las Figs. 3 y 5 se nota que la viscosidad de los dos polímeros utilizados decrece con el incremento de la temperatura. El efecto que ejerce la temperatura sobre los dos polímeros PPH es similar. Se observa que las reducciones en viscosidad van decreciendo con la disminución de la concentración de las soluciones del polímero. Considerando los dos tipos, P-700 y P-500 para una misma concentración y de acuerdo a los resultados de la Tabla 1, donde se indica el porcentaje de reducción en viscosidad entre la temperatura ambiente y 180 °F, se puede decir que el efecto que ejerce la temperatura sobre la viscosidad es igual, no importa la concentración de la solución o el tipo de polímero Pusher. En promedio, el porcentaje de reducción es del 61.0%. No se puede asegurar si el efecto de la temperatura sea igual para otros tipos de polímeros. Esto indica que en los proyectos de campo se debe tener muy en cuenta el efecto que sobre la viscosidad de las soluciones de polímeros tiene la temperatura del yacimiento.

Se anota que el calentamiento se hizo dejando la solución de polímero en contacto con el aire; ésto implica que la presión se mantuvo constante a la presión atmosférica y por lo tanto pudo ocurrir escape de vapores. Para aclarar si la reducción de viscosidad por temperatura a presión atmosférica se debe a la reducción de viscosidad del solvente, se elaboró la Fig. 6, la cual indica que la disminución de la viscosidad del agua (solvente) con temperatura, en su mayor parte, es la responsable de la disminución de la viscosidad de las soluciones del polímero, al incrementar la temperatura. Para soluciones con concentraciones mayores de 400 ppm de polímero y a temperaturas entre 100 y 160 °F su comportamiento se aleja de una línea horizontal debido quizás a escape de vapores. Cerca a 180 °F puede pensarse en el comienzo de la degradación térmica de las moléculas del polímero. Además, la presencia del oxígeno del aire puede producir reacciones de oxidación que en parte sean responsables de la reducción de viscosidad al aumentar la temperatura. Según Mungan y asoc. (6) y Smith (11), la disminución en la viscosidad de las soluciones de polímeros cuando la temperatura aumenta, es debida solamente a la disminución en la viscosidad del agua. Si lo anterior fuera cierto, se hubiera obtenido igual reducción de viscosidad para las distintas concentraciones de polímero, lo que no sucede en esta investigación; por lo cual la disminución en la viscosidad de las soluciones de polímeros con la temperatura se debe a la disminución de la viscosidad del solvente y a la degradación térmica de polímero siendo la primera, la causa principal de esa disminución a temperaturas inferiores a 180 °F.

2. Efecto de la Salinidad a Diferentes Temperaturas.

La Fig. 7 es un ejemplo del efecto de la sal (cloruro de sodio) sobre la viscosidad de las soluciones de polímeros, para concentraciones de 200, 500 y 1000 ppm. a una determinada temperatura. Todas las soluciones indican variaciones apreciables de la viscosidad para pequeños cambios de la salinidad en concentraciones menores del 0.5% por peso, no importa la temperatura empleada. Para valores mayores de 1.0% por peso de NaCl, la viscosidad prácticamente permanece constante. El comportamiento en la variación de la viscosidad con el incremento de NaCl a diferentes temperaturas es similar para los dos tipos de Pusher usados. Las soluciones de polímeros Pusher son polielectrolitos al disolverse en agua; la adición de NaCl reduce las cargas netas sobre las moléculas, lo cual se cree reduce el tamaño efectivo de las mismas y por lo tanto la viscosidad.

La diferencia en viscosidad entre los dos tipos de polímeros, para igual concentración (porcentaje de NaCl) y temperatura es casi despreciable, teniendo una diferencia máxima de 0.3 cst. y reduciendo esta diferencia a medida que aumenta la salinidad de la solución.

A medida que aumenta la concentración de la salmuera en la solución de polímero, disminuye el efecto de la temperatura, tal como indica la Tabla 2.

En la Tabla 4 se compara el efecto marcado en la reducción de la viscosidad de las soluciones de polímeros, debido a pequeñas cantidades de NaCl, siendo mayor en el polímero de mayor peso molecular. El efecto combinado de temperatura y NaCl reduce aún más la viscosidad de las soluciones de polímeros.

Según los resultados obtenidos en esta parte de la investigación, se puede decir que en un programa de inyección para yacimientos con agua altamente salada es indiferente usar cualquiera de los dos tipos de Pusher 700 ó 500. Teniendo en cuenta el efecto negativo que tiene la sal sobre la viscosidad de las soluciones de polímeros, se recomienda inyectar un tapón de agua de baja concentración de sales (puede ser la misma que se usa en la preparación del polímero) que desplace el agua de yacimiento, impidiendo que ésta se ponga en contacto con la solución de polímeros. El volumen de este tapón puede ser de 0.1 volumen poroso, como se sugiere en los procesos de inyección de agua con surfactantes (7).

3. Efecto Combinado del pH y de la Temperatura.

Las Figs. 8 y 9 son muestras de los ensayos realizados correspondientes al efecto que ejerce la temperatura sobre la viscosidad de las soluciones de polímeros a distintas concentraciones y diferentes valores de pH e igual porcentaje de NaCl. La reducción de viscosidad con el aumento de temperatura de las soluciones de polímeros a las cuales se les ajustó el pH, por adición de HCl o NaOH, fue similar a la reducción de viscosidad de la solución original (sin adición de ácido o base).

Para altos y bajos valores de pH se disminuye el efecto de la temperatura sobre

la reducción de la viscosidad, lo cual puede notarse según los cálculos de los porcentajes promedios de reducción en viscosidad presentados en la Tabla 3.

La Fig. 10 indica el efecto del pH sobre la viscosidad de las soluciones de polímero al 0.5% de NaCl por peso, a distintas concentraciones y a una temperatura dada. Se aprecia que los valores mayores de viscosidad, para una misma concentración de polímeros, se obtienen para un intervalo de pH comprendido entre 7.0 y 11.0, notándose así mismo en este intervalo las diferencias mayores en viscosidad entre las soluciones de un mismo tipo de polímero a distintas concentraciones, y aumentando esta diferencia a medida que la concentración de polímero incrementa. A bajos y altos pH las viscosidades de las soluciones tienden a ser similares.

Al comparar los anteriores resultados con los presentados por Ferrer (4), se observa que el intervalo de pH donde se obtiene los valores máximos de viscosidad no es alterado por la temperatura.

El comportamiento de las soluciones de polímeros al variar su pH puede explicarse debido a que el efecto de los ácidos o bases sobre las moléculas de los polímeros disueltos en agua destilada o salmuera es semejante al ejercido por el NaCl, puesto que neutralizan las cargas eléctricas de los mismos reduciendo el tamaño de las moléculas, bajando así la viscosidad.

Las Figs. 11 y 12 presentan la variación del pH a medida que aumenta la concentración, en ppm., del polímero, para soluciones en agua destilada y salmuera a distintos porcentajes de NaCl por peso. Los pH observados en las diferentes soluciones fueron superiores a 7.0, indicando que los Pusher analizados tienen carácter básico. El Pusher 500 produce soluciones más básicas que el 700, debido quizás a una posible diferencia en cuanto al grado de hidrólisis. El carácter básico de las soluciones aumenta a medida que incrementa la concentración de polímero y disminuye con el aumento de NaCl.

La variación del pH de la solución con la concentración de polímero no tiene efecto significativo sobre la viscosidad de la solución, ya que el rango en que varía el pH está comprendido en la porción de máxima viscosidad.

4. Degradación Térmica de los Polímeros en Ausencia de Oxígeno.

La Tabla 5 presenta los resultados de los ensayos realizados en esta parte de la investigación. La degradación de los dos tipos de Pusher analizados, a una misma concentración e igual calentamiento, es prácticamente igual. Para un calentamiento a 130 °F, con duración de 48 horas, de una solución de 500 ppm de polímero al 0.5% de NaCl por peso, para los dos Pusher, prácticamente no hay degradación térmica. Para un calentamiento a 230 °F e igual duración, el grado de degradación del P-700 y P-500 es respectivamente 35.1 y 32.9%. Calentando a temperaturas mayores, la degradación térmica de los dos polímeros se hace más similar, obteniéndose para el P-700, 59.3 y 62.6% a temperaturas de 300 y 350 °F; para el P-500 se obtuvo degradación de 60.3 y 61.8% a las mismas temperaturas.

El estudio de la degradación térmica para un mismo tipo de polímero P-700 y soluciones a concentraciones de 200, 500 y 1000 ppm en salmuera al 0.5% por peso, indica que la única solución que mostró degradación, después de un calentamiento a 130 °F, fue la de 1000 ppm, con un grado de degradación de 3.6%, siendo relativamente bajo; ésto es quizás debido a reacciones de oxidación con el oxígeno del aire ya que este calentamiento no se realizó dentro de la celda de acero. Para calentamiento a temperatura de 300 °F, el grado de degradación fue de 25.5, 59.3 y 77.2% para concentraciones de 200, 500 y 1000 ppm respectivamente; los grados de degradaciones aumentaron a 31.7, 62.6 y 78.3% respectivamente después de un calentamiento a 350 °F.

La viscosidad obtenida de las soluciones de polímeros, no importa su concentración, después de haberse efectuado su calentamiento a una temperatura superior a 130 °F son muy similares; pero el grado de degradación térmica aumenta a medida que se incrementa la concentración del polímero. El pH de las soluciones disminuye a medida que se incrementa la temperatura.

El cambio en la viscosidad de las soluciones de polímeros después de un calentamiento a temperaturas mayores de 200 °F es quizás debido a un rompimiento de las largas cadenas de las moléculas del polímero.

Comparando los valores de viscosidad para las soluciones obtenidas después de un calentamiento a 350 °F, con la viscosidad del solvente, se aprecia que el incremento de la viscosidad en la solución debido a la adición del polímero prácticamente ha desaparecido; o sea, el polímero ya ha perdido la propiedad de aumentar la viscosidad de la salmuera.

Se anota que al calentar las soluciones de polímero P-700 para concentraciones de 500 y 1000 ppm a temperaturas de 300 °F, algunas veces, la solución tomó una coloración café amarilloso dando valores de viscosidad igual a la del agua. Al filtrar estas soluciones coloreadas a través de tierra de infusorios (tierra de diatomáceas) perdieron totalmente el color, lo cual se piensa que la coloración fue debida a carbonización. Los resultados en la Tabla 5 corresponden a soluciones no coloreadas después del calentamiento.

CONCLUSIONES

1. La viscosidad de las soluciones de polímeros decrece con el incremento de la temperatura. El efecto que ejerce la temperatura sobre los polímeros P-700 y P-500 es más o menos igual, no importa la concentración o clase de polímero. En todos los casos se obtuvo una disminución del 61.0% al pasar de 78 °F (temperatura ambiente) a 180 °F (temperatura del yacimiento) a presión atmosférica.

2. El NaCl reduce apreciablemente la viscosidad de las soluciones de polímero, siendo mayor en el polímero de más alto peso molecular. Se indican variaciones apreciables de la viscosidad para pequeños cambios de salinidad en soluciones con

concentraciones menores al 0.5% por peso. Para valores mayores del 1.0% por peso de NaCl, la viscosidad prácticamente permanece constante. La temperatura no produjo cambios apreciables en el efecto del NaCl sobre la viscosidad.

3. El comportamiento en la variación de la viscosidad con el incremento de NaCl a diferentes temperaturas es similar para los dos tipos de Pusher analizados, en tal forma que la diferencia en viscosidad entre ellos a temperatura constante, igual concentración y porcentaje de NaCl, es despreciable.

4. El pH de la solución de polímero incrementa moderadamente a medida que aumenta la concentración del polímero, mostrando el carácter básico de los polímeros utilizados. El P-500 produce soluciones más básicas que el P-700.

5. La reducción de viscosidad con el aumento de temperatura de las soluciones de polímeros a las cuales se les ajustó el pH, por adición de HCl ó NaOH, fue similar a la reducción de viscosidad de la solución original (sin modificación del pH). El efecto combinado que ejerce el pH y la temperatura sobre las soluciones de polímeros es similar para los dos tipos de Pusher analizados.

6. A bajos y altos pH las viscosidades de las soluciones de los dos Pusher tienden a ser similares. Los mayores valores de viscosidad se obtienen para un intervalo de pH comprendido entre 7.0 y 11.0 y este intervalo no es alterado por la temperatura.

7. El grado de degradación térmica en ausencia de oxígeno que sufren soluciones de polímeros P-700 y P-500 en salmuera al 0.5% por peso, para igual concentración de polímero, es más o menos igual cuando se calienta a una temperatura determinada. Para un calentamiento a 230 °F con duración de 48 horas, se obtuvo para los dos Pusher 700 y 500, a 500 ppm, una degradación térmica de 35.1 y 32.9% respectivamente. Dicho grado de degradación aumenta a medida que se incrementa la concentración del polímero; por ejemplo, para un calentamiento a temperatura de 300 °F, la solución de P-700 a concentraciones de 200, 500 y 1000 ppm, la degradación térmica fue respectivamente 25.5, 59.3 y 77.2%.

8. Para soluciones de polímeros Pusher en salmuera al 0.5% por peso, la degradación térmica, en ausencia de oxígeno, prácticamente comienza alrededor de 200 °F y se completa a 350 °F.

Solución en Agua Destilada	REDUCCION* (%)	
	P-700	P-500
100 ppm	59.7	60.8
200 ppm	59.8	63.0
300 ppm	59.1	61.2
400 ppm	59.2	57.3
500 ppm	62.5	60.3
600 ppm	60.8	63.4
700 ppm	60.3	62.6
800 ppm	60.2	61.2
900 ppm	61.2	61.9
1000 ppm	61.0	61.4

0% de Reducción promedio = 61.0
 0% de Reducción para agua destilada = 60.3

* % Reducción = $\frac{\mu 78^{\circ}\text{F} - \mu 180^{\circ}\text{F}}{\mu 78^{\circ}\text{F}} \times 100$

TABLA 1:

Porcentaje de Reducción de la Viscosidad por Incremento de la Temperatura entre 78 y 180°F para Soluciones de Polímeros P-700 y P-500 en Agua Destilada.

SOLUCION	REDUCCION* (%)	
	P-700	P-500
200 ppm, 0,2% NaCl	61.8	63.0
500 ppm, 0,2% NaCl	66.6	65.0
1000 ppm, 0,2% NaCl	66.4	65.7
	Promedio = 64.7	
200 ppm, 0,5% NaCl	59.0	61.5
500 ppm, 0,5% NaCl	62.3	63.3
1000 ppm, 0,5% NaCl	63.7	63.6
	Promedio = 63.9	
200 ppm, 1,0% NaCl	61.6	62.6
500 ppm, 1,0% NaCl	60.6	61.4
1000 ppm, 1,0% NaCl	65.3	63.8
	Promedio = 62.5	
200 ppm, 2,0% NaCl	59.7	61.5
500 ppm, 2,0% NaCl	59.2	61.7
1000 ppm, 2,0% NaCl	64.4	65.2
	Promedio = 61.9	

* % Reducción = $\frac{\mu 78^{\circ}\text{F} - \mu 180^{\circ}\text{F}}{\mu 78^{\circ}\text{F}} \times 100$

TABLA 2:

Porcentaje de Reducción de la Viscosidad por Incremento de la Temperatura entre 78 y 180°F para Soluciones de Polímeros P-700 y P-500 a diferentes porcentajes de NaCl por Peso.

SOLUCION	REDUCCION* (%)	
	P-700	P-500
200 ppm, pH = 4.0, 0.5% NaCl	60.2	61.0
500 ppm, pH = 4.0, 0.5% NaCl	60.4	59.6
1000 ppm, pH = 4.0, 0.5% NaCl	60.8	60.4
	Promedio = 60.4	
200 ppm, pH = 6.0, 0.5% NaCl	61.7	61.5
500 ppm, pH = 6.0, 0.5% NaCl	63.8	61.3
1000 ppm, pH = 6.0, 0.5% NaCl	60.9	59.5
	Promedio = 61.5	
200 ppm, pH = 10.0, 0.5% NaCl	64.6	63.0
500 ppm, pH = 10.0, 0.5% NaCl	63.3	63.1
1000 ppm, pH = 10.0, 0.5% NaCl	60.3	60.2
	Promedio = 62.4	
200 ppm, pH = 12.0, 0.5% NaCl	61.1	63.1
500 ppm, pH = 12.0, 0.5% NaCl	64.7	64.9
1000 ppm, pH = 12.0, 0.5% NaCl	61.0	61.6
	Promedio = 62.8	
200 ppm, pH = 13.4, 0.5% NaCl	60.8	61.1
500 ppm, pH = 13.4, 0.5% NaCl	61.6	62.7
1000 ppm, pH = 13.4, 0.5% NaCl	57.2	57.1
	Promedio = 60.0	

$$* \% \text{ Reducción} = \frac{\mu 78^\circ\text{F} - \mu 180^\circ\text{F}}{\mu 78^\circ\text{F}} \times 100$$

TABLA 3:

Porcentaje de Reducción de la Viscosidad por Incremento de la Temperatura entre 78 y 180°F para Soluciones de Polímeros P-700 y P-500 al 0.5% de NaCl por Peso, y diferentes valores del pH.

SOLUCION	REDUCCION* (%)	
	P-700	P-500
200 ppm, 0.2% NaCl	57.5	54.8
200 ppm, 0.5% NaCl	62.8	59.4
200 ppm, 1.0% NaCl	65.7	63.6
500 ppm, 0.2% NaCl	74.5	62.1
500 ppm, 0.5% NaCl	78.3	68.8
500 ppm, 1.0% NaCl	82.0	74.0
1000 ppm, 0.2% NaCl	82.5	67.8
1000 ppm, 0.5% NaCl	88.5	78.4
1000 ppm, 1.0% NaCl	90.7	83.2

$$* \% \text{ Reducción} = \frac{\mu \text{ inic} - \mu \text{ final}}{\mu \text{ inic}} \times 100$$

$\mu \text{ inic}$ = Viscosidad de la solución en agua destilada.
 $\mu \text{ final}$ = Viscosidad de la solución en salmuera.

Porcentaje de Reducción de la Viscosidad por Incremento de la Salinidad para Soluciones de Polímeros P-700 y P-500 para Concentraciones de 200, 500 y 1000 ppm de Polímero a Temperatura de 78°F.

TABLA 5:

Resultados del estudio de la Degradación Térmica en ausencia de Oxígeno de Soluciones de Polímeros P-700 y P-500 al 0.5% de NaCl por peso para diferentes ppm del Polímero.

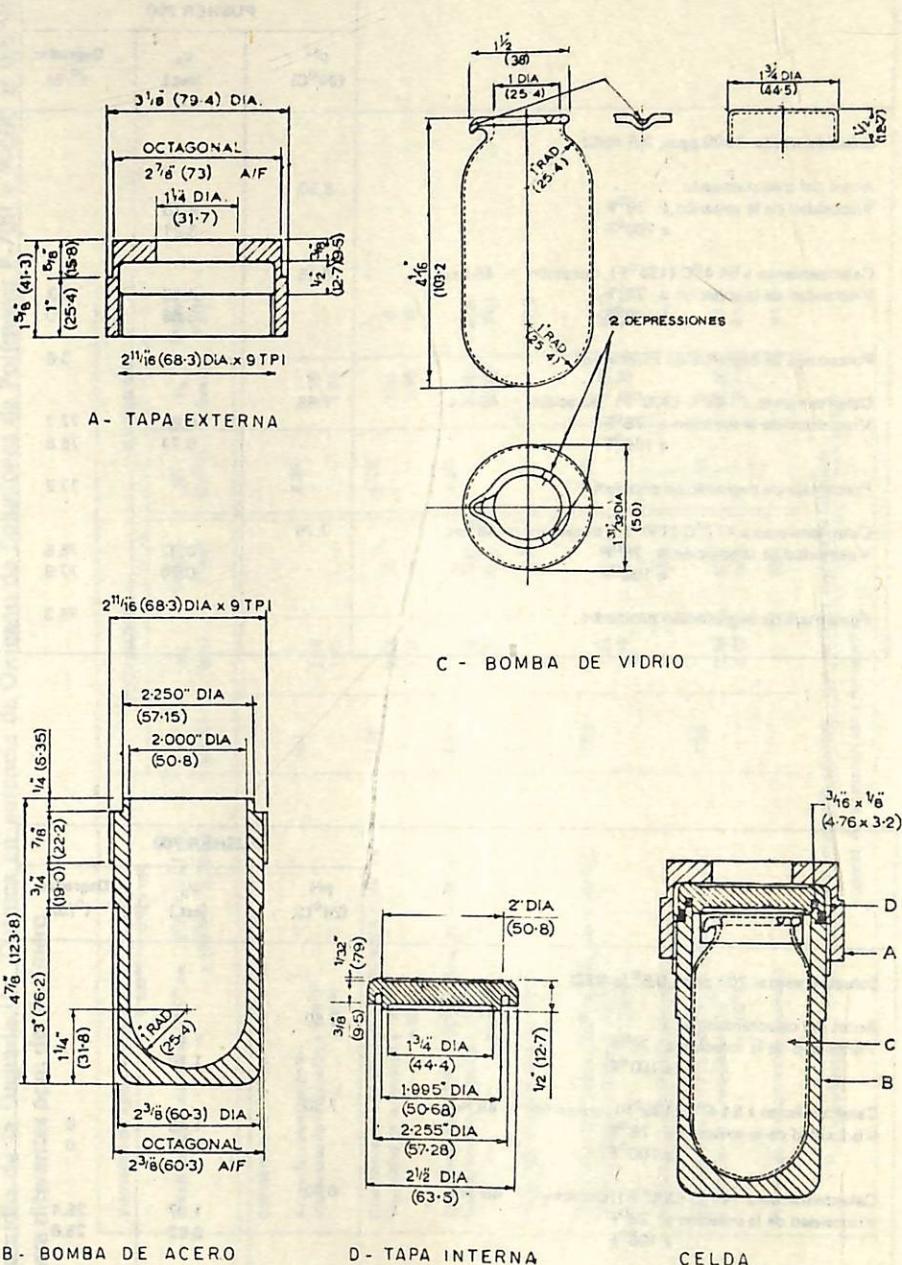
Viscosidad del agua destilada a 78°F = 0.895 cst. a 100°F = 0.689 cst.	PUSHER 700			PUSHER 500		
	pH (24°C)	μ_p (cst.)	Degrad. (%)*	pH (24°C)	μ_p (cst.)	Degrad. (%)*
Viscosidad de la salmuera al 0.5% a 78°F = 0.91 cst. a 100°F = 0.70 cst.						
Solución usada: 500 ppm, 0.5% NaCl						
Antes del calentamiento	8.0			8.35		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		2.55 1.95			2.35 1.84	
Calentamiento a 54.4°C (130°F), duración = 48 hrs.	7.98			8.20		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		2.58 1.97	0 0		2.39 1.85	0 0
Calentamiento a 110°C (230°F), duración = 48 hrs.	7.80			7.90		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		1.66 1.26	34.9 35.4		1.58 1.23	32.8 33.1
Porcentaje de degradación promedio			35.1			32.9
Calentamiento a 149°C (300°F), duración = 48 hrs.	7.40			7.60		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		1.04 0.79	59.2 59.4		1.00 0.78	60.8 59.9
Porcentaje de degradación promedio			59.3			60.3
Calentamiento a 177°C (350°F), duración = 48 hrs.	7.35			7.46		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		0.94 0.73	62.7 62.5		0.90 0.71	62.0 61.8
Porcentaje de degradación promedio			62.6			61.9

$$\text{• \% Degradación} = \frac{\text{Viscosidad de la solución antes de calentam.} - \text{Visc. de la sol. después de calentada}}{\text{Viscosid. de la solución antes del calentam.}} \times 100$$

	PUSHER 700		
	pH (24°C)	μ_p (cst.)	Degradac. (%)
Solución usada: 1000 ppm, 0.5 NaCl			
Antes del calentamiento	8.30		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		4.33 3.21	
Calentamiento a 54.4°C (130°F), duración = 48 hrs.	8.15		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		4.18 3.08	3.3 4.0
Porcentaje de degradación Promedio			3.6
Calentamiento a 149°C (300°F), duración = 48 hrs.	7.85		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		0.96 0.74	77.7 76.8
Porcentaje de degradación promedio			77.2
Calentamiento a 177°C (350°F), duración = 48 hrs.	7.75		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		0.92 0.70	78.8 77.9
Porcentaje de degradación promedio			78.3

	PUSHER 700		
	pH (24°C)	μ_p (cst.)	Degradac. (%)
Solución usada: 200 ppm, 0.5% NaCl			
Antes del calentamiento	7.60		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		1.44 1.10	
Calentamiento a 54.4°C (130°F), duración = 48 hrs.	7.50		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		1.43 1.00	0 0
Calentamiento a 149°C (300°F), duración = 48 hrs.	6.60		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		1.07 0.82	25.4 25.6
Porcentaje de degradación promedio			25.5
Calentamiento a 177°C (350°F), duración = 48 hrs.	6.50		
Viscosidad de la solución a 78°F a 100°F		0.96 0.76	33.3 30.0
Porcentaje de degradación promedio			31.7

TABLA 3



nota: todas las dimensiones están en pulgadas (mm.)

Fig. 1 Celda utilizada en el estudio de la degradación térmica de soluciones de polímero.

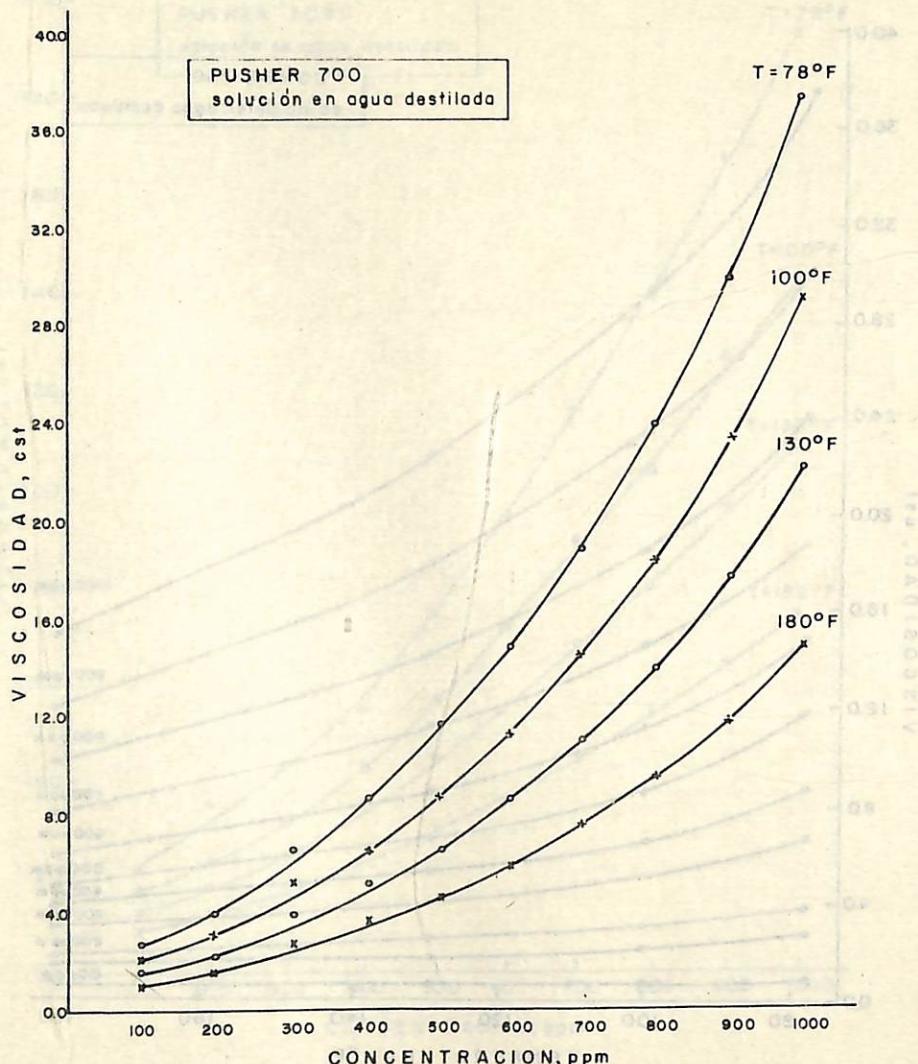


Fig. 2 Viscosidad en función de la concentración de la solución del P-700 en agua destilada a diferentes temperaturas.

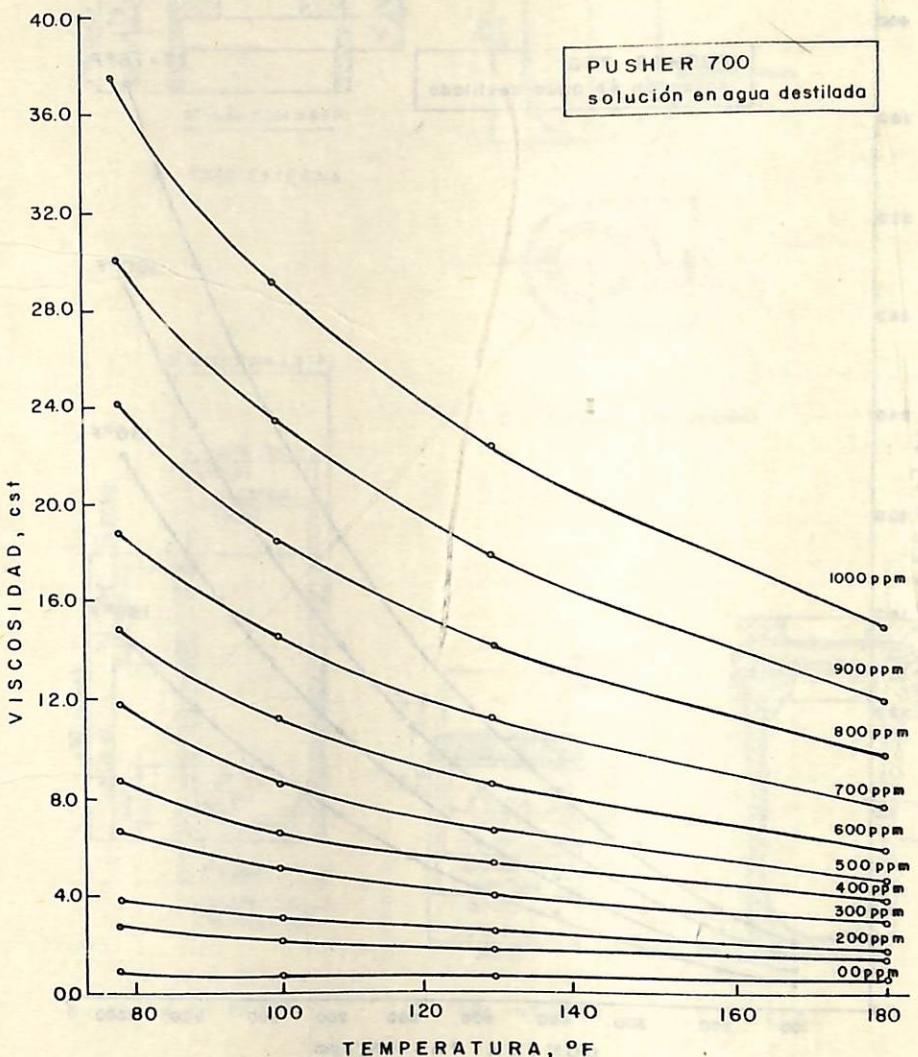


Fig. 3 Viscosidad en función de la temperatura de la solución de polímero P-700 en agua destilada a diferentes concentraciones.

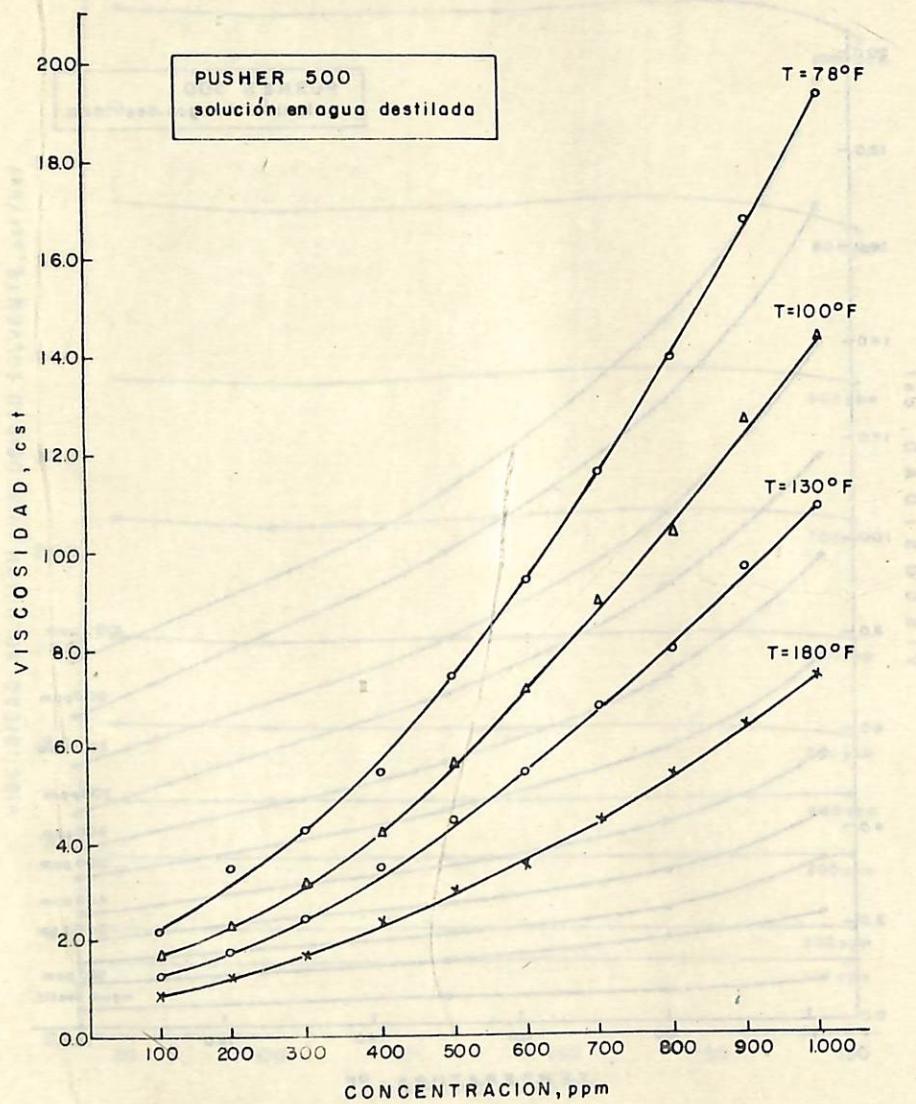


Fig. 4 Viscosidad en función de la concentración de la solución de polímero P-500 en agua destilada a diferentes temperaturas.

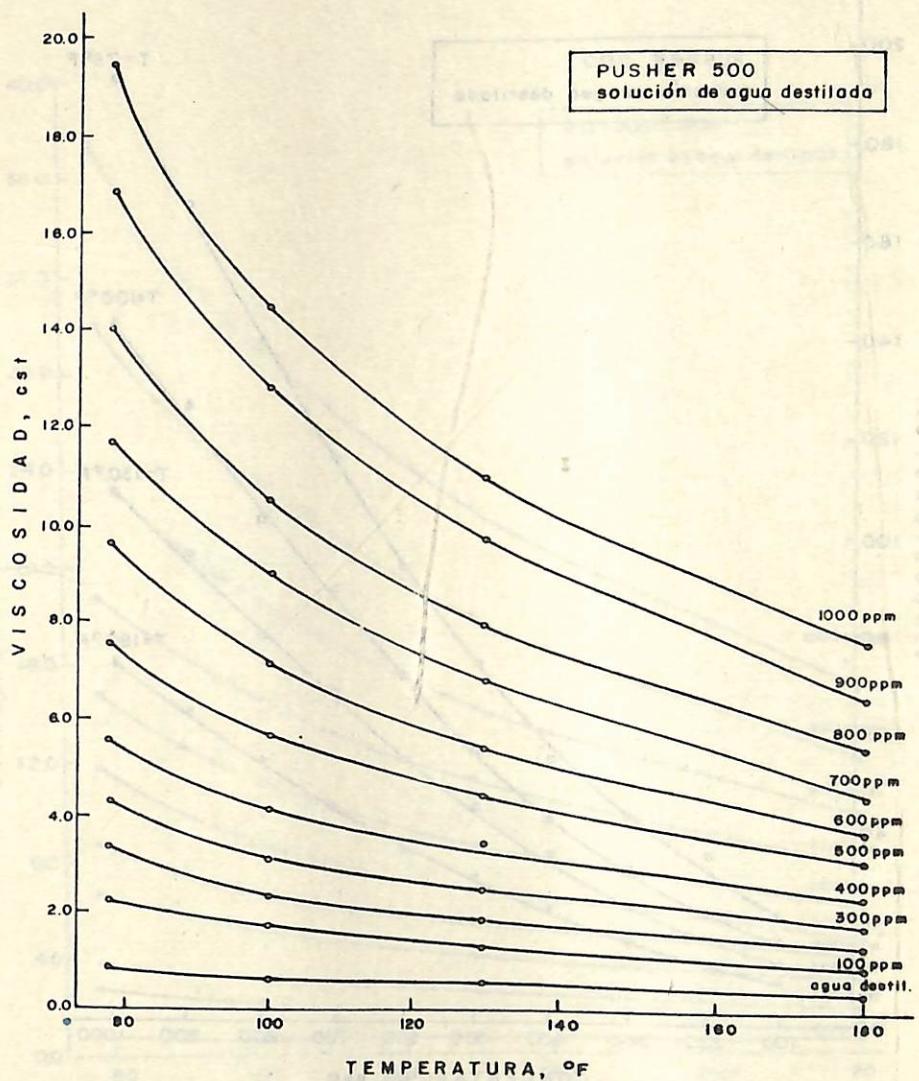


Fig. 5 Viscosidad en función de la temperatura de la solución de polímero P-500 en agua destilada a diferentes concentraciones.

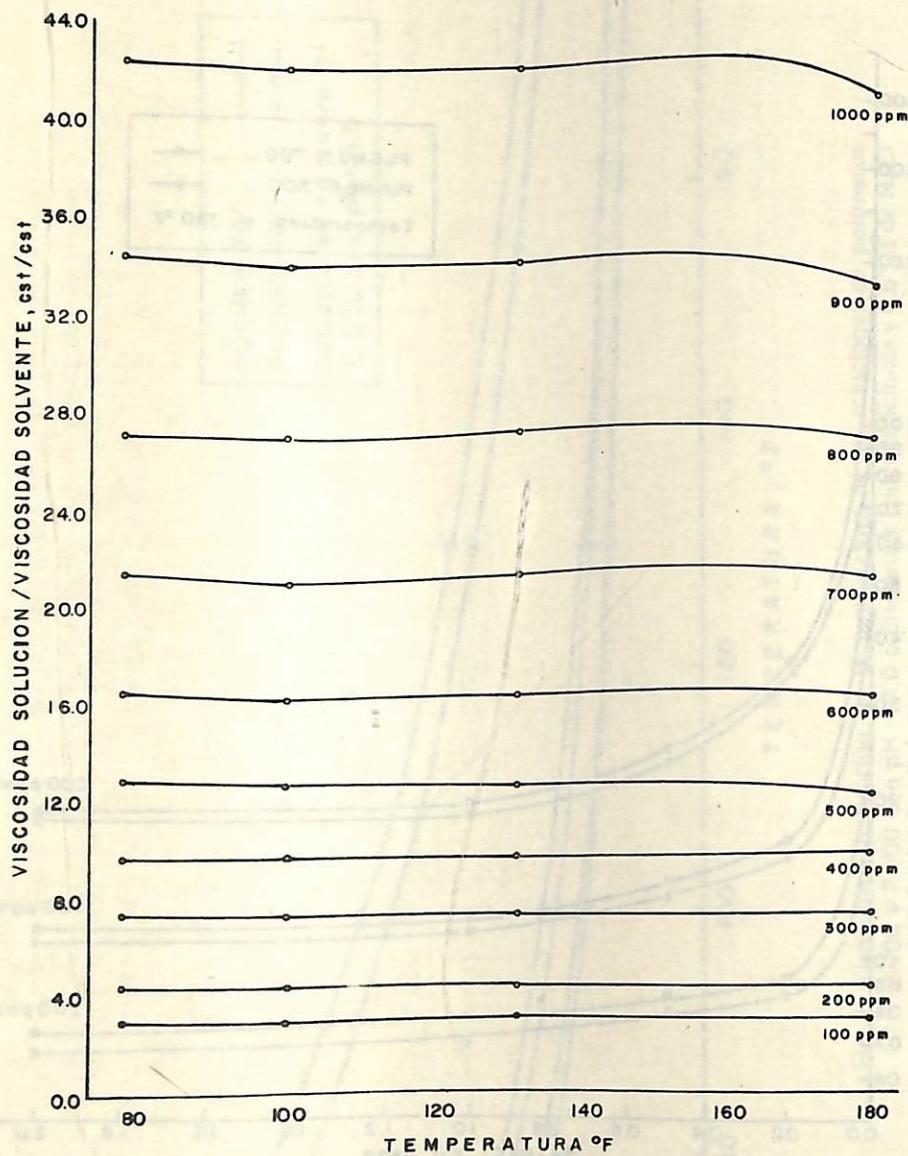


Fig. 6 Relación de viscosidad de la solución de polímeros P-700 a diferentes concentraciones con la del agua destilada, en función de la temperatura.

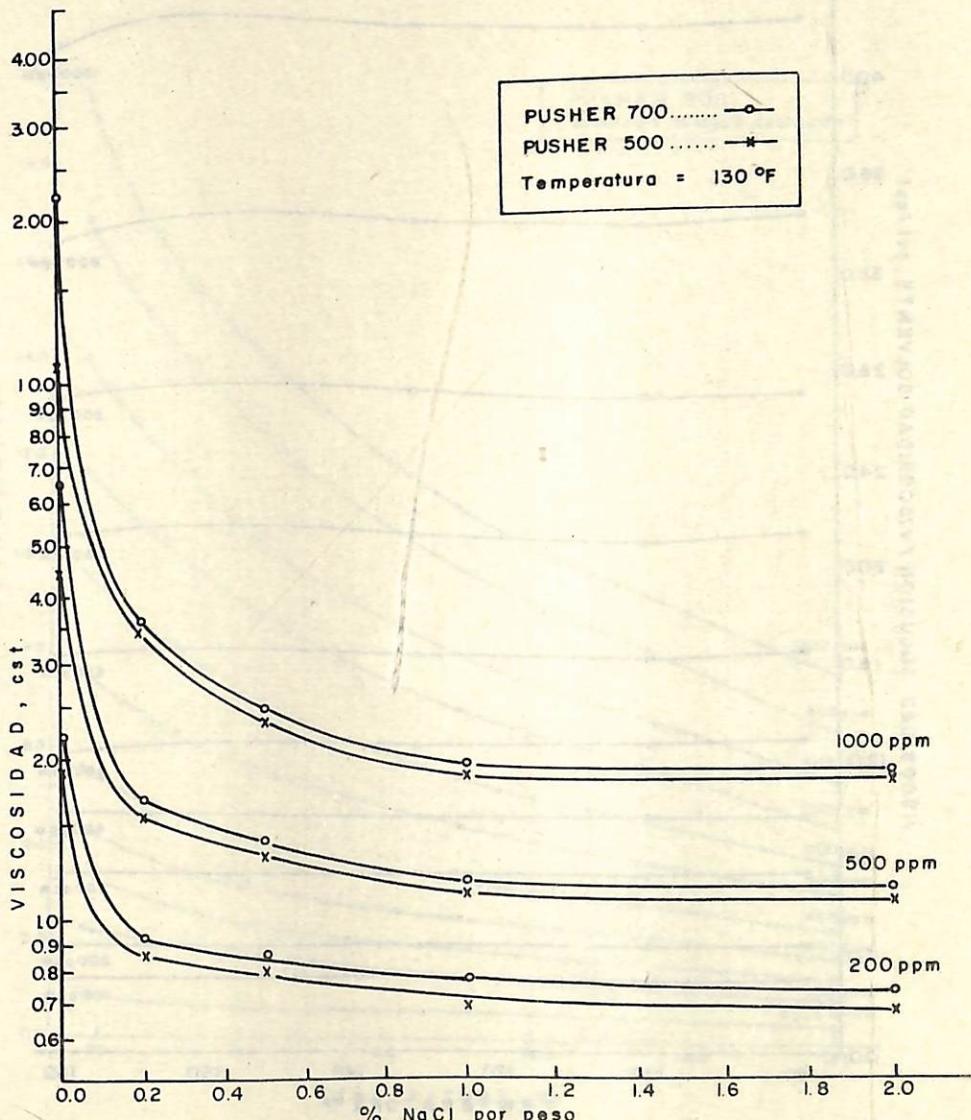


Fig. 7 Viscosidad en función de la concentración de NaCl de las soluciones de polímeros P-700 y P-500 a diferentes concentraciones y a temperatura de 130 °F.

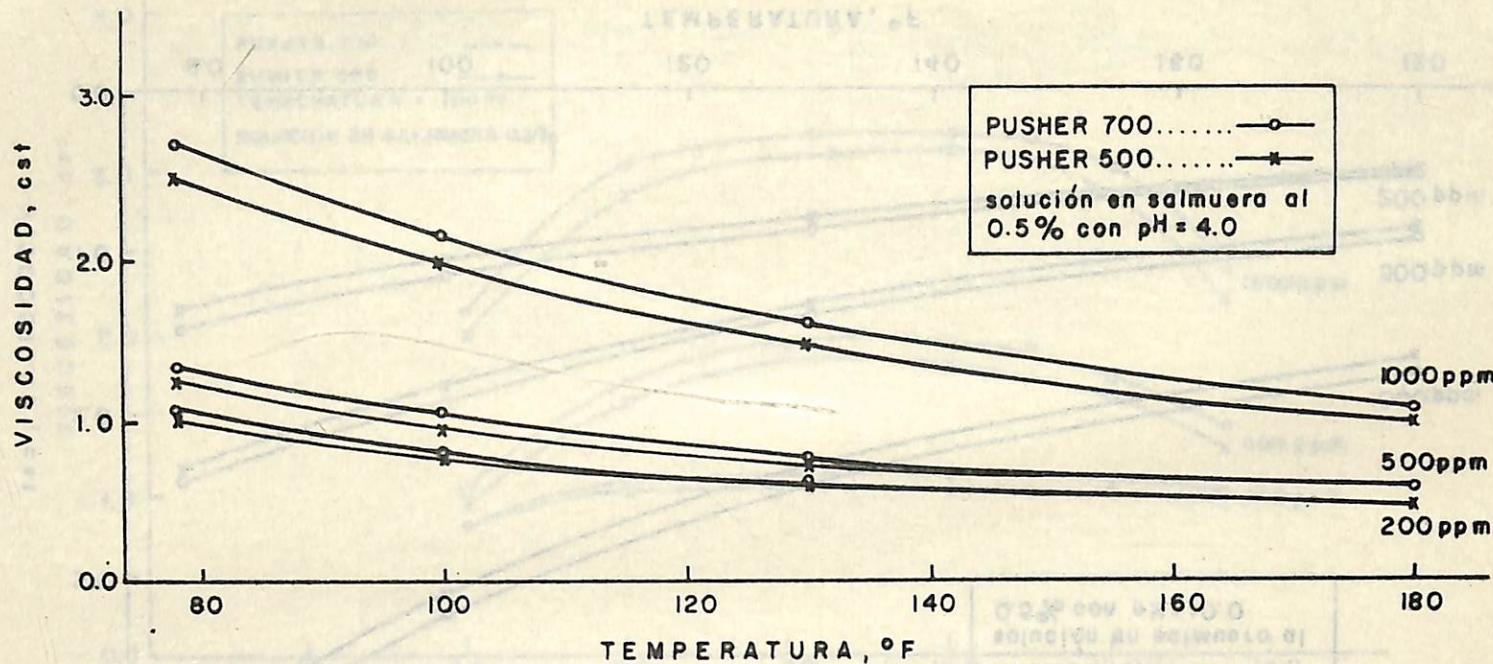


Fig. 8 Viscosidad en función de la temperatura de las soluciones de polímeros P-700 y P-500 con pH = 4.0 a diferentes concentraciones y 0.5% de NaCl por peso.

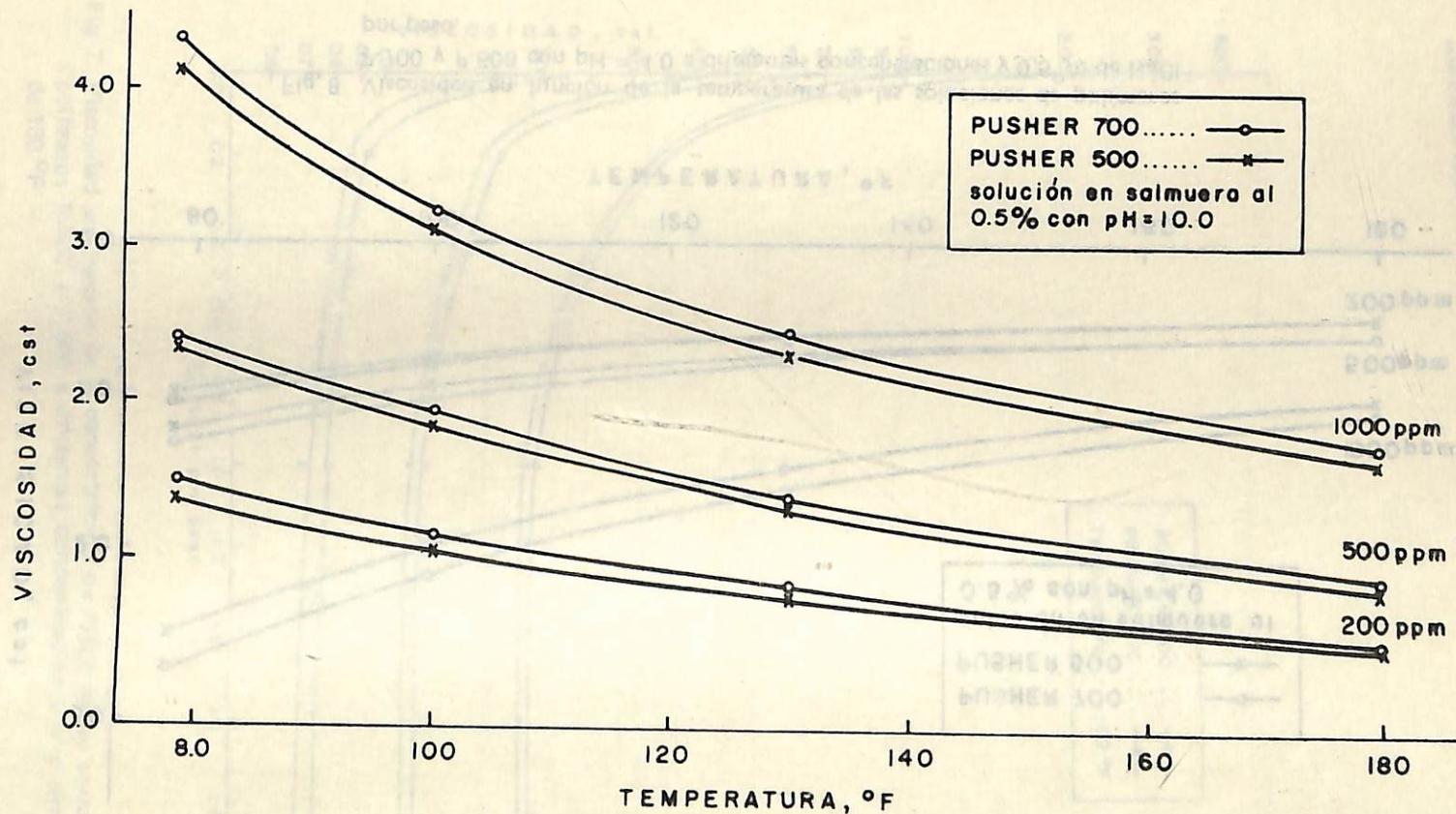


Fig. 9 Viscosidad en función de la temperatura de las soluciones de polímeros P-700 y P-500 al 0.5% de NaCl por peso son pH = 10.0 a diferentes concentraciones.

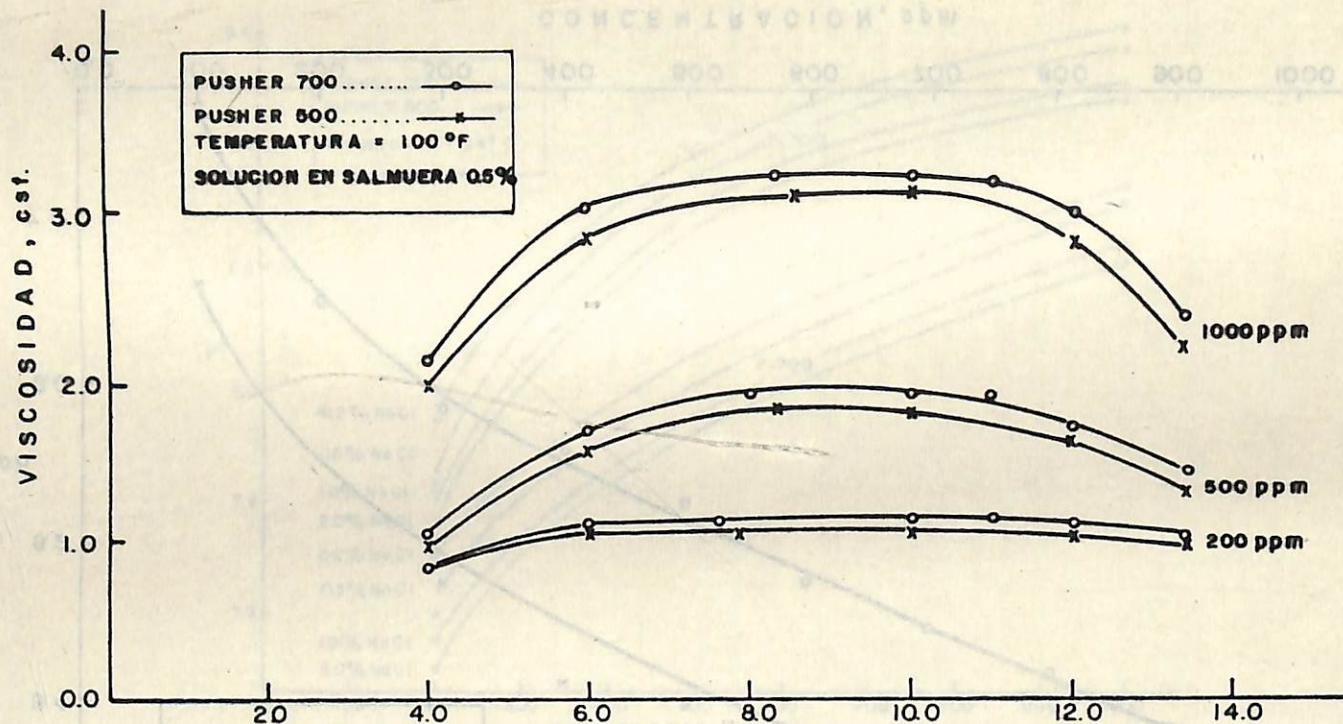


Fig. 10 Viscosidad en función del pH de las soluciones de polímeros P-700 y P-500 al 0.5% de NaCl por peso con diferentes concentraciones o temperatura de 100 °F.

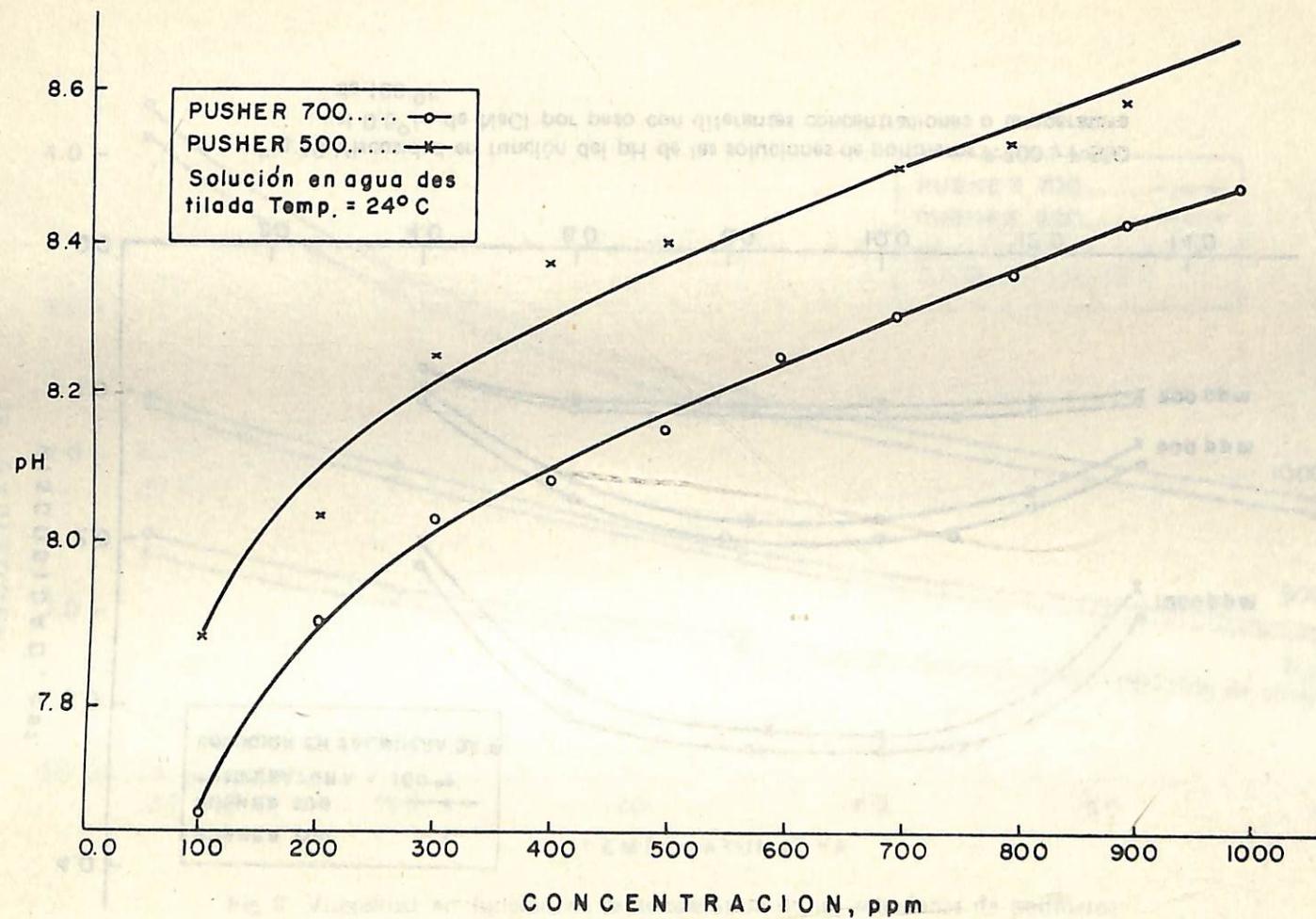


Fig. 11 pH en función de la concentración de las soluciones de polímeros P-700 y P-500 en agua destilada a temperatura de 24°C.

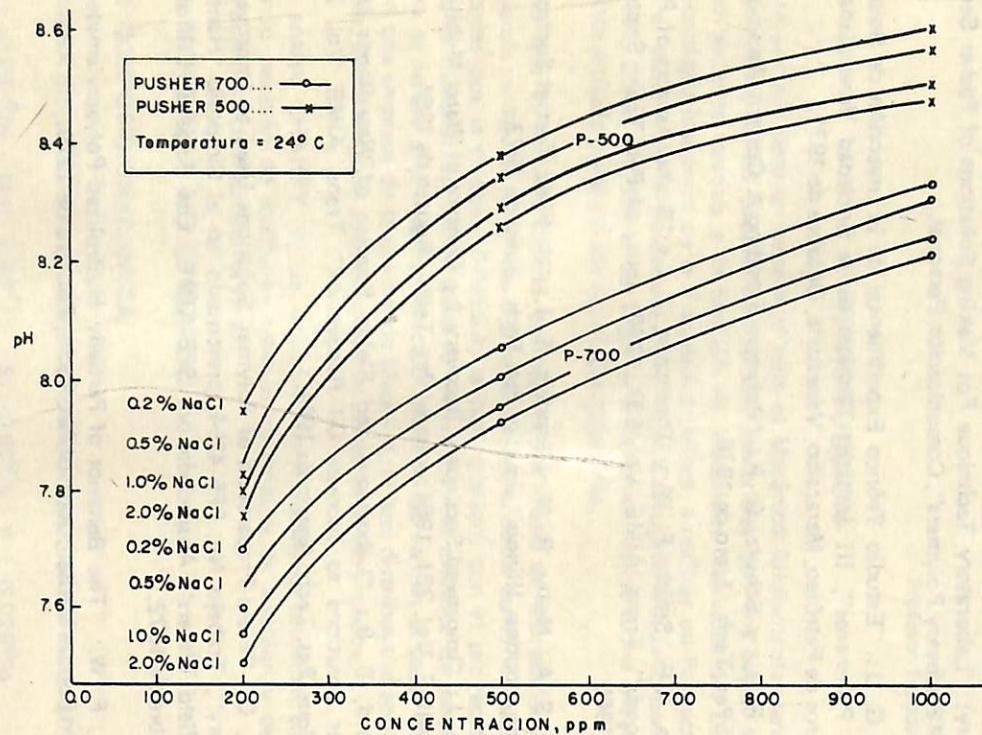


Fig. 12 pH en función de la concentración de las soluciones de polímeros P-700 y P-500 a diferentes porcentajes de NaCl por peso y temperatura de 24° C.

REFERENCIAS

1. Bruce, L. K.: "Reservoir Stability of Polymer Solution", Journal of Pet. Tech., Mayo de 1973.
2. Castaño, B. L.: "Inyectan Polímero con Excelentes Resultados", Petróleo Interamericano, Vol. 28, No. 6, Junio de 1970.
3. Dow Chemical U.S.A., Functional Products and Systems - Secondary Oil Recovery: "Laboratory Technique For Making Solutions of Pusher Secondary Oil Recovery Polymers", Comunicación Personal.
4. Ferrer, G. J.: "Estudio Teórico Experimental de la Inyección de Soluciones de Polímeros", III Jornadas Técnicas de la Sociedad Venezolana de Ingenieros de Petróleo, Maracaibo, Venezuela, Octubre de 1971.
5. Jewett, R. L. y Schurz, G. P.: "Polymer Flooding-A Current Appraisal", Jour. of Pet. Tech., Junio de 1970.
6. Mungan, N.F., Smith, F. W. y Thompson, J. L.: "Some Aspects of Polymer Floods", Trans. AIME, Vol. 237, 1966; Jour. of Pet. Tech., Septiembre de 1966.
7. Pursley, S. A., Healy, R. N. y Sandvik, E. I.: "A Field Test of Surfactant Flooding, Loudon, Illinois", Jour. of Pet. Tech., Julio de 1973.
8. Pye, D. J.: "Improved Secondary Recovery by Control of Water Mobility", Trans. AIME, Vol. 231, 1964; Jour. of Pet. Tech., Agosto de 1964.
9. Sandiford, B. B.: "Laboratory and Fields Studies of Waterfloods Using Polymer Solutions to Increase Oil Recoveries", Trans. AIME, Vol. 231, 1964; Jour. Pet. Tech. Agosto de 1964.
10. Schurz, G.: "Field Preparation of Polymer Solutions Used to Improve Oil Recovery", Trabajo No. SPE-4254, presentado en el Simposio "Handling of Oilfield Waters" Auspiciado por SPE-AIME, Los Angeles, California, Diciembre de 1972.
11. Smitch, F. W.: "The Behavior of Partially Hydrolized Polyacrylamide Solution in Porous Media", Jour. of Pet. Tech., Febrero de 1970.

N. de la D.: Invitamos a los lectores a discutir este artículo. Se reciben comentarios hasta Junio 30/78.