

# SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

## XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

### REDUCCIÓN DE LA PÉRDIDA DE CARGA DE FLUJOS EN TUBERÍAS POR ADICIÓN DE POLÍMEROS.

ARIEL D. CRESPO A.<sup>1</sup>  
ALDO TAMBURRINO T.<sup>2</sup>  
CHRISTIAN IHLE B.<sup>3</sup>  
HUMBERTO PALZA C.<sup>4</sup>

#### RESUMEN

El transporte de fluidos a través de tuberías es el método más sencillo para transportar fluidos de un punto a otro. En Chile este es método por el cual se transporta el concentrado de cobre y agua para aplicaciones mineras. Por este motivo es importante desarrollar e investigar una metodología que haga más eficiente y eficaz el transporte de fluidos a través de tuberías.

La adición de pequeñas cantidades de polímeros de alto peso molecular en flujos de fluidos líquidos, generan profundos cambios en los fenómenos hidrodinámicos característicos del flujo original, ello genera que el flujo se con incremente hasta en un 80% con respecto al original. Estos compuestos poliméricos son denominados agentes reductores de arrastre (DRAs, *drag reduction agents*). Estudios previos evaluaron a los DRAs a Reynolds no superiores a los 60000.

Esta investigación busca determinar el efecto de: la concentración, la variación de caudales y el tiempo (debido a la degradación de las cadenas poliméricas) sobre DRAs sintéticos como el óxido de polietileno (PEO) y naturales como el Alginato, sobre la pérdida de carga del flujo en régimen turbulento ( $Re > 50000$ ) en un sistema cerrado con recirculación a temperatura constante. Para ello se usó PEO ( $M_w = 4 \cdot 10^6$  g/mol) y Alginato de viscosidad media, que llegaron a alcanzar valores de Re de hasta 140000 con tres concentraciones diferentes de PEO y Alginato (50, 100 y 300ppm) respectivamente, y otra tanda a 50 y 100 ppm para tres caudales (0.86, 1.50 y 2.27 L/s) todos a temperatura constante de 22°C.

Este trabajo contempla el estudio del efecto de los DRAs en el factor de fricción en tuberías  $f$ , a diferentes concentraciones y caudales, al igual que su variación en el tiempo. Estos resultados permitieron evaluar la eficiencia de los DRAs usados comparándolos con los valores máximos alcanzados por la asíntota de máxima reducción de la pérdida de carga de Virk (MDRV). Dicha comparación reveló que el alginato es el más cercano a la MDRV.

<sup>1</sup>Estudiante de Doctorado, Depto. de Ingeniería Química y Biotecnología, FCFM, Universidad de Chile - [darielcrear@ug.uchile.cl](mailto:darielcrear@ug.uchile.cl)

<sup>2</sup>Profesor Asociado, Depto. de Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile - [atamburr@cec.uchile.cl](mailto:atamburr@cec.uchile.cl)

<sup>3</sup>Profesor Asistente, Depto. de Ingeniería Minas, FCFM, Universidad de Chile - [cihle@ing.uchile.cl](mailto:cihle@ing.uchile.cl)

<sup>4</sup>Profesor Asociado, Depto. de Ingeniería Química y Biotecnología, FCFM, Universidad de Chile - [hpalza@ing.uchile.cl](mailto:hpalza@ing.uchile.cl)

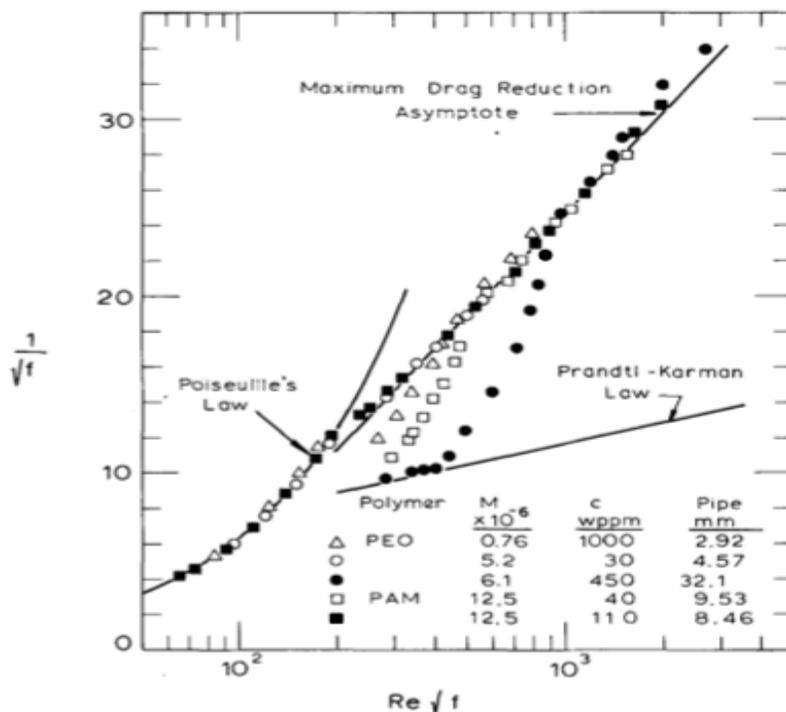
# 1. INTRODUCCIÓN

Toms en 1949 descubrió que la adición de cantidades mínimas (5-10ppm) de moléculas poliméricas de alto peso molecular eran capaces de reducir la pérdida de presión en ductos que presentaban regímenes turbulentos, haciendo de este hallazgo algo prometedor. Con esto se halló una solución parcial al problema de ahorro de energía en flujos turbulentos de líquidos a través de tuberías (Gyr & Bewersdorff, 1995).

La relevancia de este descubrimiento generó un alto impacto en la industria, debido a que el transporte de fluidos a través de tuberías, es parte de la mayoría de los procesos industriales en todas sus escalas. Algunos ejemplos son la industria petrolera, el transporte y distribución de agua, el transporte de material desde centros mineros y alcantarillados. Por este motivo es importante que el transporte en tuberías pueda elevar su eficiencia energética.

La reducción de la pérdida de carga por el uso de agentes poliméricos (DRAs de su nombre en inglés *drag reduction by additives*) permite alcanzar una mayor eficiencia y eficacia en el transporte de fluidos por tuberías, logrando alcanzar un incremento del caudal de hasta un 80 % con muy pequeñas cantidades de polímero, sin tener que realizar un cambio o modificación drástico en el sistema. Es decir que se puede evitar la implementación de una tubería paralela o un cambio de bomba, para aumentar el flujo del sistema.

Generar la Reducción de la pérdida de carga (*drag reduction DR*) requiere de un régimen turbulento. En ausencia de este, la DR es inexistente. La DR puede llegar a alcanzar un punto máximo, que es independientemente de la concentración del polímero, este punto es conocido como la asíntota máxima de reducción de arrastre, determinada por Virk, (1975).



**Figura 1.** Efecto del PEO y del PAM en el factor de fricción  $f$ , según Virk (1975).

La Figura 1 pertenece a la publicación de Virk (1975) en la que muestra el efecto del PEO y de la poliacrilamida (PAM) en el valor de  $f$  a diferentes concentraciones y valores de  $Re f^{0.5}$ , validando su reajuste de la ley de Prandtl, que se conoce como MDRV (*maximum drag reduction of Virk*). En la MDRV se puede observar que algunas concentraciones de PAM como de PEO son capaces de alcanzar y hasta sobrepasarla ligeramente, sin embargo, los valores correspondientes a  $Re f^{0.5}$  no sobrepasan los valores de  $4 \cdot 10^3$ .

Warholic et. al (1999) observaron la influencia de los polímeros en la turbulencia para la reducción de la fricción (DR) y estudiaron los efectos que en ella tienen la concentración, el número de Reynolds y el mezclado. Este estudio se realizó con óxido de polietileno (PEO), empleando como elemento impulsor una bomba centrífuga. El resultado más relevante del estudio, fue que la DR depende de la forma en que la mezcla polimérica es agregada, debido a que la efectividad del polímero depende de la cantidad de agregados presentes en el disolvente, debido a que la presencia de estos afecta en la degradación química del polímero disuelto (Warholic et. al. 1999).

Los flujos que carecen de aditivos, presentan una capa límite turbulenta compuesta por tres regiones: 1) la subcapa viscosa, donde el transporte está dominado por la difusión viscosa y el perfil de velocidad es lineal. 2) La capa de transición o de amortiguamiento, donde las mezclas por difusión viscosa y turbulenta son comparables. 3) La zona turbulenta en la que el transporte está dominado por la mezcla turbulenta (McAbe & Smith, 1973).

Diversas teorías se han desarrollado para explicar el mecanismo de los DRAs, la mayoría coincide que el régimen turbulento realiza una buena difusión del polímero y al mismo tiempo “engrosa” el espesor de la capa amortiguadora (*Buffer layer*), en esta capa, el polímero disuelto tiende a instalarse.

Virk propuso en 1970 el modelo de la subcapa elástica para disoluciones de macromoléculas lineales. Según este modelo, la subcapa elástica se sitúa inmediatamente después de la subcapa viscosa y se origina al momento de agregar el polímero, para luego crecer, reduciendo la fricción, en un proceso continuo hasta que, finalmente, ocupa toda la sección transversal de la tubería, alcanzando el máximo de reducción de la fricción (Virk, 1971).

Las escalas de tiempo asociadas a la turbulencia ( $T_T$ ) y a la relajación del polímero ( $T_P$ ) juegan un papel importante en el proceso de reducción de la fricción. Si  $T_T < T_P$ , la turbulencia no tiene ningún efecto en la degradación del polímero. Para  $T_T > T_P$ , la molécula polimérica se estira y la viscosidad elongacional (resistencia que presentan los fluidos a fluir cuando están sometidos a un esfuerzo normal) se incrementa en cuatro órdenes de magnitud. Este fenómeno se manifiesta preferentemente en las proximidades de la pared, suprimiendo las fluctuaciones turbulentas e incrementando el espesor de la subcapa de amortiguación, con la consecuente reducción de fricción de la pared (Sreevinasan & White, 2000).

La eficiencia de un DRA, se suele determinar basándose en la proximidad que este es capaz de alcanzar con respecto al porcentaje de DR correspondiente al valor de  $f$  a las mismas condiciones en la máxima reducción de la pérdida de carga (*Maximum drag reduction of Virk MDRV*), la cual es un reajuste de la Ley de la pared de Prandtl, la cual se define a través de la siguiente ecuación:

$$f_s^{-\frac{1}{2}} = 4 \log \left( Re f^{-\frac{1}{2}} \right) - 0.4 \quad (1)$$

El reajuste formulado por Virk genera la siguiente ecuación:

$$f_a^{-\frac{1}{2}} = 19 \log \left( Re f^{-\frac{1}{2}} \right) - 32.4 \quad (2)$$

esta expresión fue determinada por Virk en 1975 y a partir de esa fecha es el parámetro usado para determinar la eficiencia de DR de un DRA, el que para un valor de Re constante está dado por:

$$\%DR = \left( \frac{f_s - f_a}{f_s} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde  $f_s$  es el factor de fricción del flujo de solvente y  $f_a$  es el factor de fricción asociado al flujo de la solución con polímero.

Un problema frecuente al estudiar el DR es la degradación del polímero, por la cual el polímero disminuye la capacidad de reducir la pérdida de carga. Este fenómeno puede darse de forma química, térmica, biológica o mecánica. La degradación química de un polímero se debe a cambios a nivel atómico, que suelen ocurrir en presencia de metales o cualquier radical iniciador cuando el oxígeno está presente; la alta salinidad o altas concentraciones de calcio en el solvente, son causantes de la degradación química (Choi et. al. 1992).

La degradación mecánica es causada por la energía mecánica a la que es sometido el polímero, es decir la energía que entrega el flujo del fluido a través de bombas, tuberías o válvulas. La degradación mecánica se debe a las tensiones de flujo, ello debido a que las moléculas poliméricas están sometidas a rotación y a la presencia de vórtices. Estas moléculas se encuentran sometidas a estiramientos y compresiones sucesivas. En este caso la presencia de vorticidad, es relativa en comparación del estiramiento que sufren las moléculas sometidas a las tensiones del flujo. Estos estiramientos son los responsables de los cortes en las cadenas poliméricas en los polímeros de alto peso molecular (ejemplo el PEO). Para poder subsanar la degradación del polímero, se debe inyectar la solución polimérica de forma continua, este método es usado generalmente en experimentos de laboratorio.

Toonder et al. (1995) realizó un estudio de los efectos de la degradación de soluciones poliméricas, en cual se utilizó 20 ppm de tres polímeros, estos fueron PEO WSR-301, Separan AP-273 y Superfloc A-110. Estos autores determinaron que el uso de PEO es inadecuado como DRA en sistemas con recirculación. Se probó que la bomba de disco es mucho más adecuada que la bomba centrífuga para el bombeo de soluciones poliméricas, ya que la primera disminuye la degradación mecánica. La forma en que se prepara el polímero mostró tener pequeña relevancia en su degradación del polímero, la hidratación o la agitación durante tiempos prolongados genera una mayor degradación de las soluciones poliméricas. Toonder et. al. (1995) también determinaron que el uso de concentraciones más elevadas subsanan la pronta degradación del polímero, el diámetro de la tubería también tiene un rol importante (debido a que su variación afecta directamente al número de Reynolds), los mayores diámetros disminuyen la degradación a pesar de ser sometidos a la mismas "velocidades de fricción del solvente"; ya que debido al tamaño de la región del núcleo del flujo se genera un efecto de deposición del polímero no degradado de alto peso molecular (Toonder et al, 1995).

Comprender la degradación de un polímero es importante, no solo para determinar la mejor forma de estabilizarlo, sino también para caracterizar los productos de la degradación del mismo (Rodríguez & Winding, 1959). Sin embargo, la mayor parte de la degradación de los DRAs se debe a altas tasas de esfuerzos mecánicos y a la intensidad de la turbulencia a las que son sometidos, en el tiempo estos factores reducen su efectividad.

## **METODOLOGÍA**

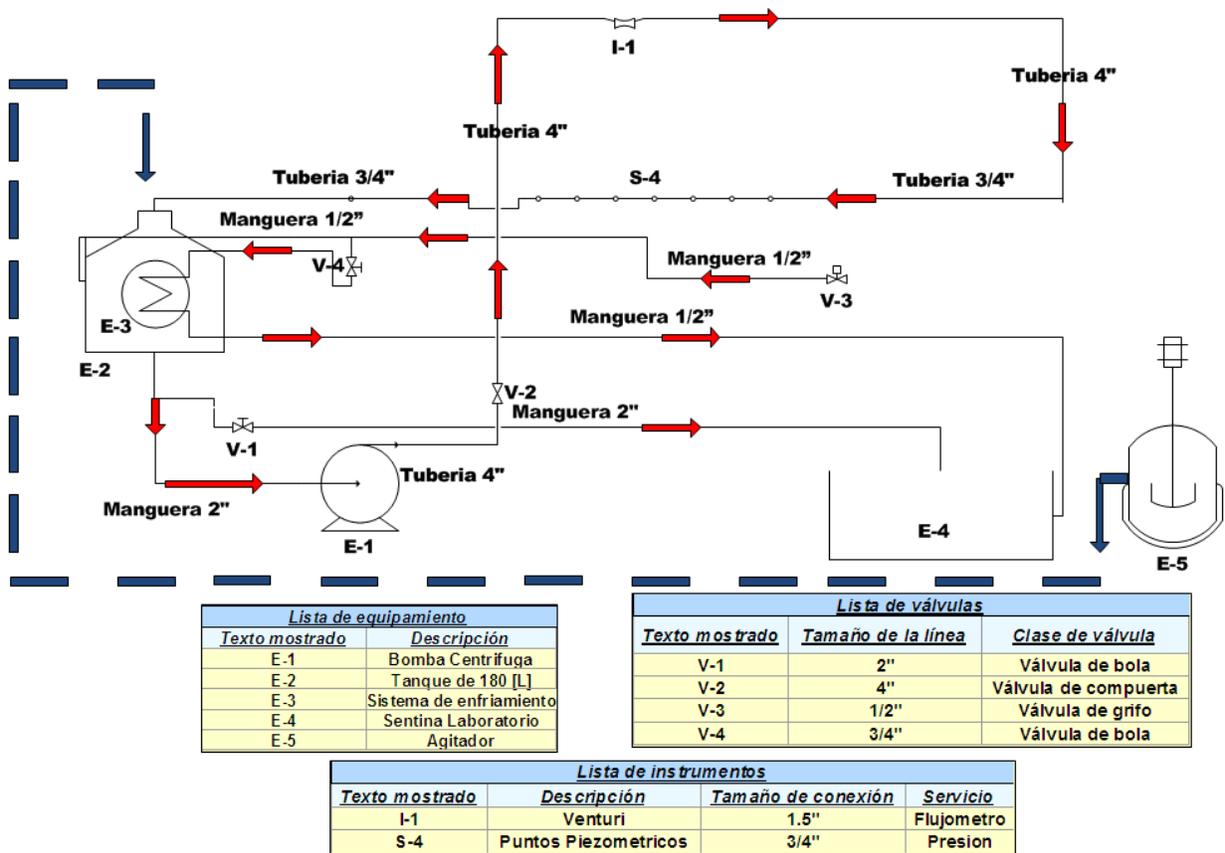
### **Instalación y Metodología Experimental**

El presente estudio se realizó mediante la disolución de PEO (peso molecular,  $M_w = 4 \cdot 10^6$  g/mol) y Alginato de viscosidad media de Sigma Aldrich en agua destilada, obteniendo soluciones concentradas de PEO como de alginato, que luego son disueltas para alcanzar concentraciones de 50 y 100ppm, en un sistema que cuenta con un volumen total de 180 l. El sistema usado para el presente estudio consta de una tubería de 6.85 m de largo, un diámetro interior de 0.02114 m, además se tienen siete puntos equidistantes a 0.5 m donde se realizaba la lectura de las diferencias de presión a lo largo de la tubería, por medio del uso de un manifold de mercurio que permite la lectura de los siete puntos de forma instantánea. La tubería es antecedida por otra tubería de 0.1016 m de diámetro interior cuya longitud es de 11.25 m. Para la medición del caudal se tiene un tubo de Venturi, el cual fue calibrado adecuadamente para poder determinar el flujo que corre a través de la tubería.

La calibración del tubo de Venturi se realizó tomando diferentes medidas de presión (tomadas de lecturas de un tubo en U con mercurio, instalado en una placa milimétrica), cronometrando varias mediciones de caudal por medio del pesado de diferentes volúmenes de agua, para luego determinar la ecuación apropiada que transforme las diferencias de presión leídas en medidas de caudal.

El tanque principal cuenta con un sistema de enfriamiento la temperatura constante del experimento a 22°C. El sistema cuenta con una bomba centrífuga EBARA tipo 3M 40-125 de tipo trifásica con una capacidad de bombeo entre 0.39 a 2.27 L/s. La Figura 2 ilustra la instalación y los equipos usados para este estudio.

Se realizaron 36 experimentos, 18 con tres concentraciones de PEO y Alginato a concentraciones de 50, 100 y 300ppm en intervalos de 20 s y 18 con dos concentraciones de PEO y Alginato con dos diferentes concentraciones 50 y 100ppm y a tres caudales diferentes (0.39, 1.53 y 2.27 L/s). Para cuantificar el porcentaje de reducción de la fricción (%DR), se utilizar Ec. (3).



**Figura 2.** Configuración de la instalación experimental en el Laboratorio F.J. Domínguez del Departamento de Ingeniería Civil.

Los valores de  $f$  se calcularon en cada uno de los siete puntos medidos por el manifold, a partir de las diferencias de presión presentadas en el mismo a partir de la ecuación de Darcy:

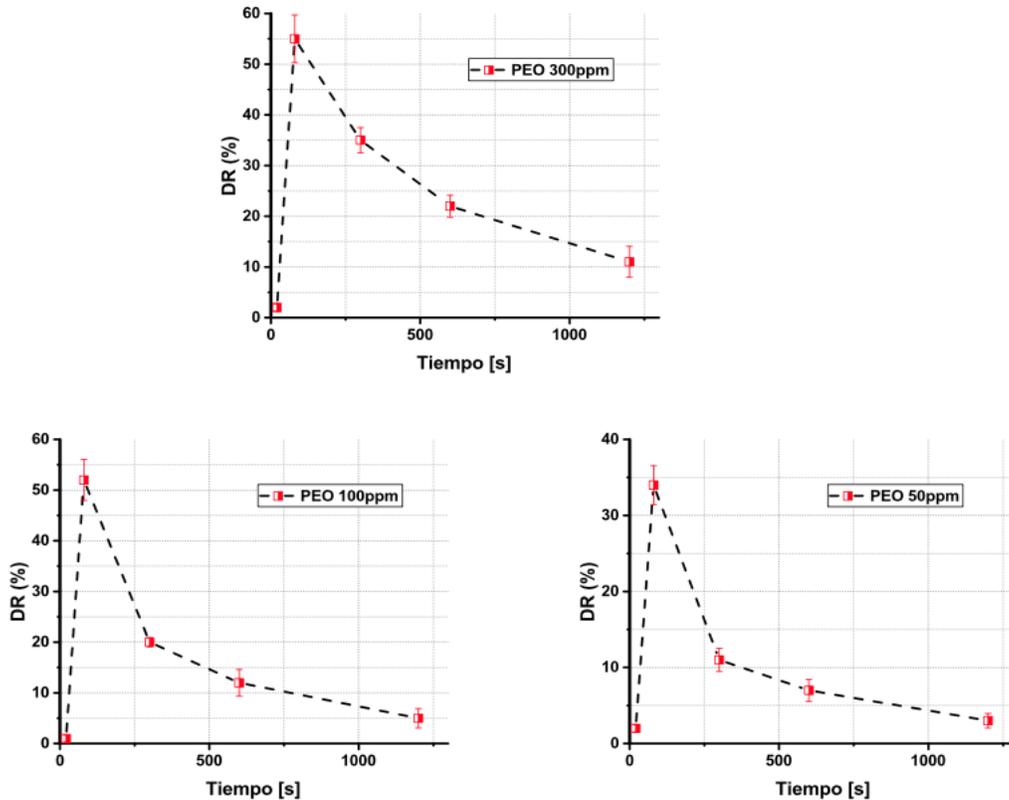
$$f = \frac{\Delta P}{\gamma} \frac{D}{L} \frac{2g}{u^2} \quad (4)$$

Donde  $\Delta P$  es la diferencia de presión entre dos puntos de medición,  $\gamma$  es el peso específico del fluido,  $u$  es la velocidad media del flujo,  $f$  es el factor de fricción de Darcy,  $L$  es la distancia entre tomas piezométricas,  $D$  es el diámetro de la tubería y  $g$  la aceleración de gravedad.

Los datos de variación de cota piezométrica tanto del tubo en U del tubo Venturi, como en el manifold se obtuvieron tomando fotografías en intervalos de cada 20 s y de 5 s. Estas fotografías fueron procesadas por un programa realizado en Java que permite convertir los pixels en distancias y así determinar los valores de  $f$ .

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Como una primera etapa de este estudio se iniciaron pruebas con el PEO debido a ser el DRA más utilizado en las publicaciones de estudios asociados al fenómeno de Toms, estas pruebas utilizaron concentraciones de 50,100 y 300 ppm (a  $Re$  constante 138000). Estas indican que usar 300ppm o 100ppm entregan un %DR casi igual, como lo menciona Virk (1975) los DRAs llegan a alcanzar un %DR máximo donde incrementar la concentración no incrementa más el % DR alcanzado. Sin embargo, el valor alcanzado no es el esperado según la MDRV propuesta por Virk (1975), el valor alcanzado es un 25 % menor, como muestra la Figura 3.

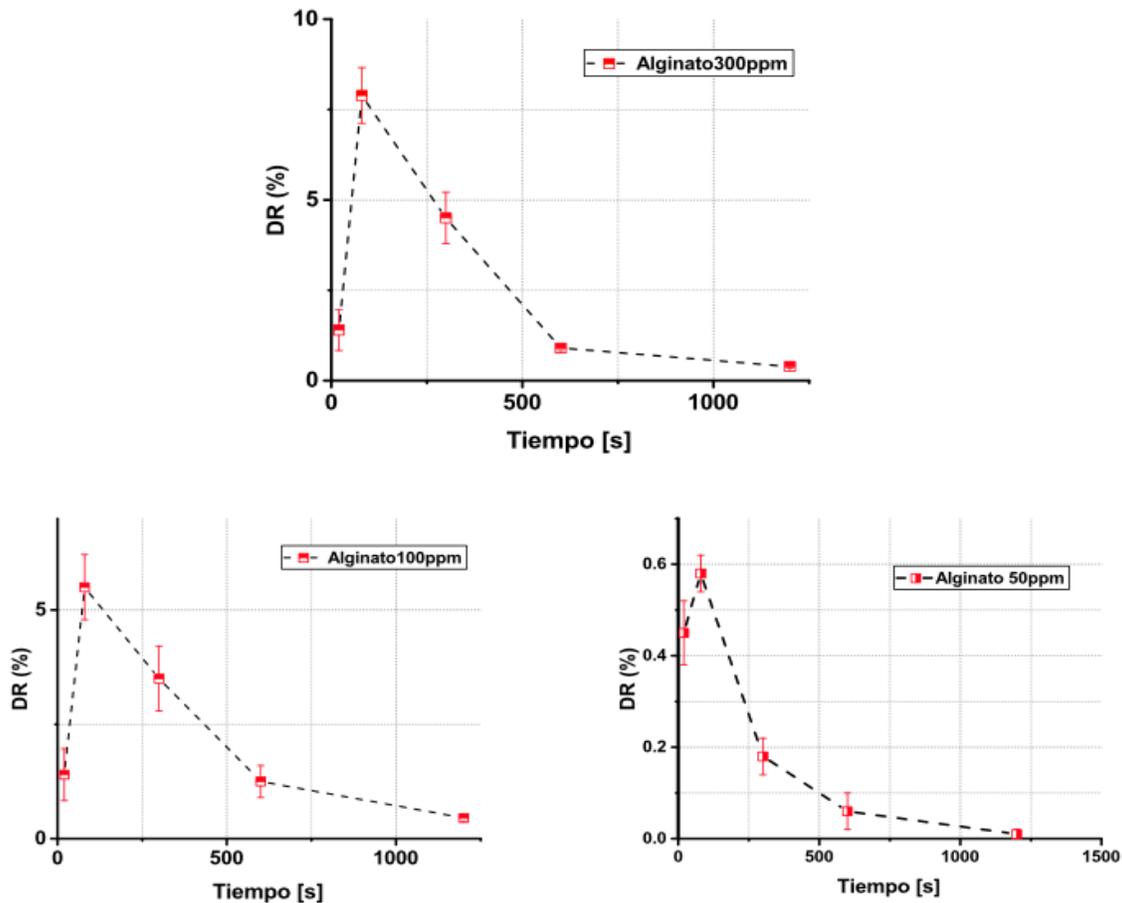


**Figura 3.** Valores de %DR alcanzados en diferentes intervalos de tiempo para el PEO a concentraciones de 50, 100 y 300 ppm con  $Re \approx 140000$ .

La diferencia en estos valores se puede deber a la previa degradación del PEO al pasar por la bomba centrífuga, antes de que se dé la primera medición, además de la falta de precisión de la instrumentación utilizada, comparada con la aplicación de instrumentación usada por las publicaciones (como un láser dopler o manómetros digitales). Por otro lado, el estudio del fenómeno a  $Re$  tan altos no ha sido datado para el PEO, por lo que la alta tasa de turbulencia también sería otro factor que incremente la tasa de degradación del polímero, en el flujo, obstaculizando al mismo a llegar a valores expuestos por Virk que fueron obtenidos experimentalmente. Los valores de  $Re$  usados en bibliografía para el estudio del PEO estaban por debajo de los 80000.

A partir de la experiencia con el PEO, se replicó la metodología con el Alginato (usando las mismas concentraciones y  $Re$ ). Experimentar con el Alginato como DRA busca evaluar el uso de una nueva alternativa en el área de los DRA, siendo este DRA biodegradable, es decir más amigable con medio ambiente. Los resultados de esta experiencia se presentan en la Figura 4, el %DR máximo alcanzado por el Alginato a 300 y 100ppm no presenta mucha diferencia de 8.47 a 6 %, respectivamente. Al igual que con el PEO se observa que el usar concentraciones de 300 o 100ppm no representa una significativa diferencia en el % de DR.

Por otro lado, el bajo valor de %DR alcanzado por el Alginato contradice la hipótesis inicial de ser una buena alternativa al PEO. Estos resultados se podrían deber al valor de  $Re$  con el que se trabajó (138000). Es importante considerar que las cadenas poliméricas del Alginato presentan menor longitud a las del PEO usado por lo que los esfuerzos mecánicos a los que se encuentra sometido este DRA, generan un mayor impacto en el Alginato, por ende, sufre una mayor degradación desde el inicio. Este hecho podría ser el causante de los bajos resultados, por lo que fue necesario revisar el intervalo con el que se registran los datos, debido a que al tomar los datos con una frecuencia de 20[s], habrían datos que no se llegan a observar.



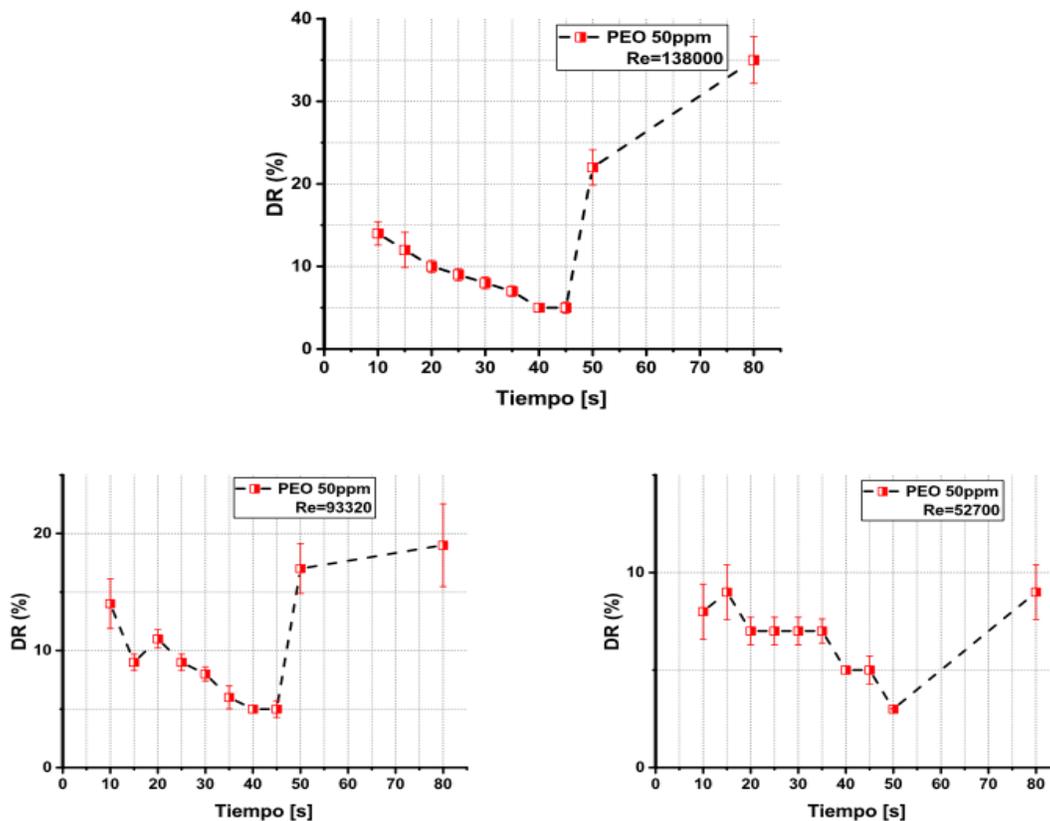
**Figura 4.** Valores de %DR alcanzados en diferentes intervalos de tiempo para el Alginato a concentraciones de 50, 100 y 300 ppm con  $Re \approx 140000$ .

Dados los resultados obtenidos en con el PEO y el Alginato (Figuras 3 y 4) se realizaron 18 experiencias nuevas con concentraciones de 50 y 100ppm (se eliminó la concentración de 300ppm

debido que este presenta resultados similares a los de 100ppm), a tres Re diferentes, uno bajo (52700), medio (33320) y alto (138000) con una toma de datos con frecuencias de 5[s]. De esta forma se obtendría una mejor apreciación del fenómeno y su desarrollo en el tiempo.

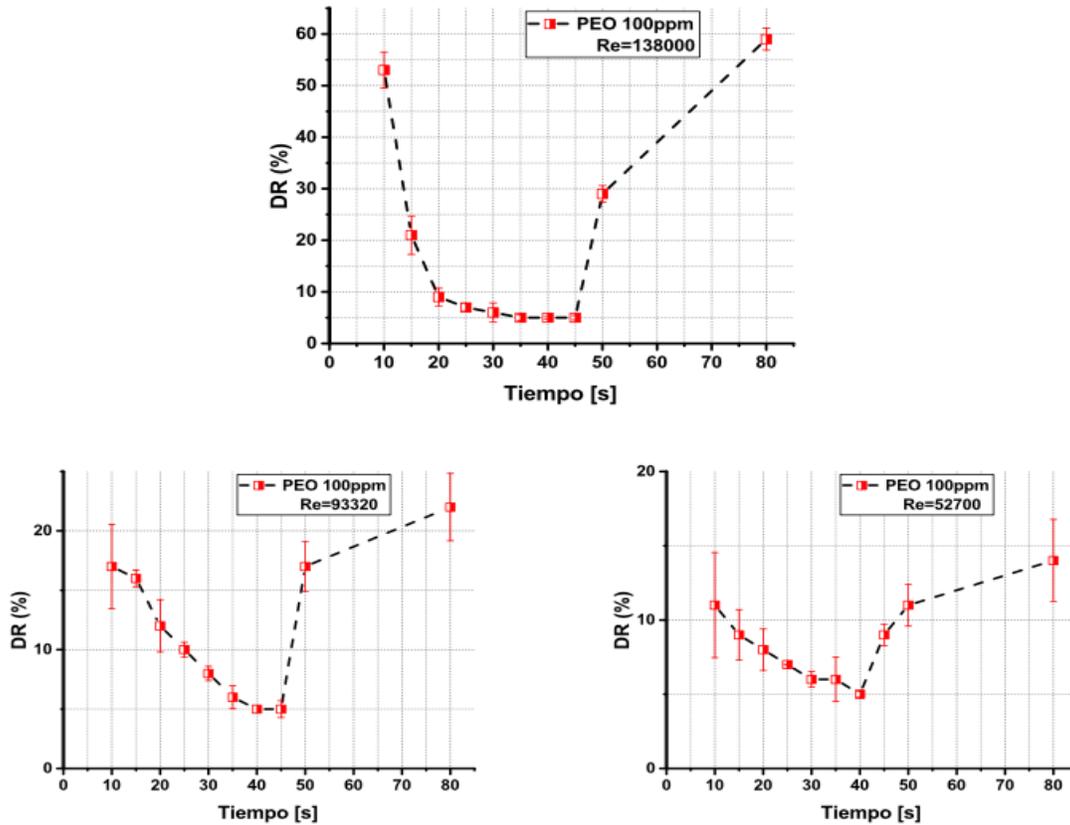
Las Figuras 5 y 6 muestran el comportamiento del PEO a 50 y 100ppm a los Re ya mencionados. En ambas concentraciones se aprecia una tasa % de DR que se va incrementando en el tiempo hasta alcanzar el máximo obtenido a los 80[s]. Estos resultados confirmaron lo observado en los intervalos de 20[s], revalidando los resultados previos, donde a Re de 138000 y a los 80[s] se observa el mayor % de DR.

Por otro lado, el hecho de bajar los intervalos de toma de datos, muestra que el PEO inicia con un % de DR que es aproximadamente del 50 % inferior al del máximo % de DR alcanzado. Este resultado se debería a que al inicio el PEO disuelto en el sistema tiende a formar agregados, los que al pasar por la bomba se dispersan alcanzando tasas de relación de aspecto altas, permitiéndole generar el %DR inicial mostrado. Sin embargo, debido a la longitud de la cadena del PEO usado, este aún no habría llegado a “desenrollar” completamente, este fenómeno se observa a los 80[s].



**Figura 5.** Comportamiento del PEO como DRA a tres diferentes valores de Reynolds con una concentración de 50ppm.

Cabe destacar que el valor de Re también afecta el %DR que puede alcanzar el PEO, tanto para 50ppm, como para 100ppm el mayor % de DR se alcanza con el Re alto, no así con los Re bajo y medio. Estos resultados ratifican los reportes de Lumley y Virk (1975).



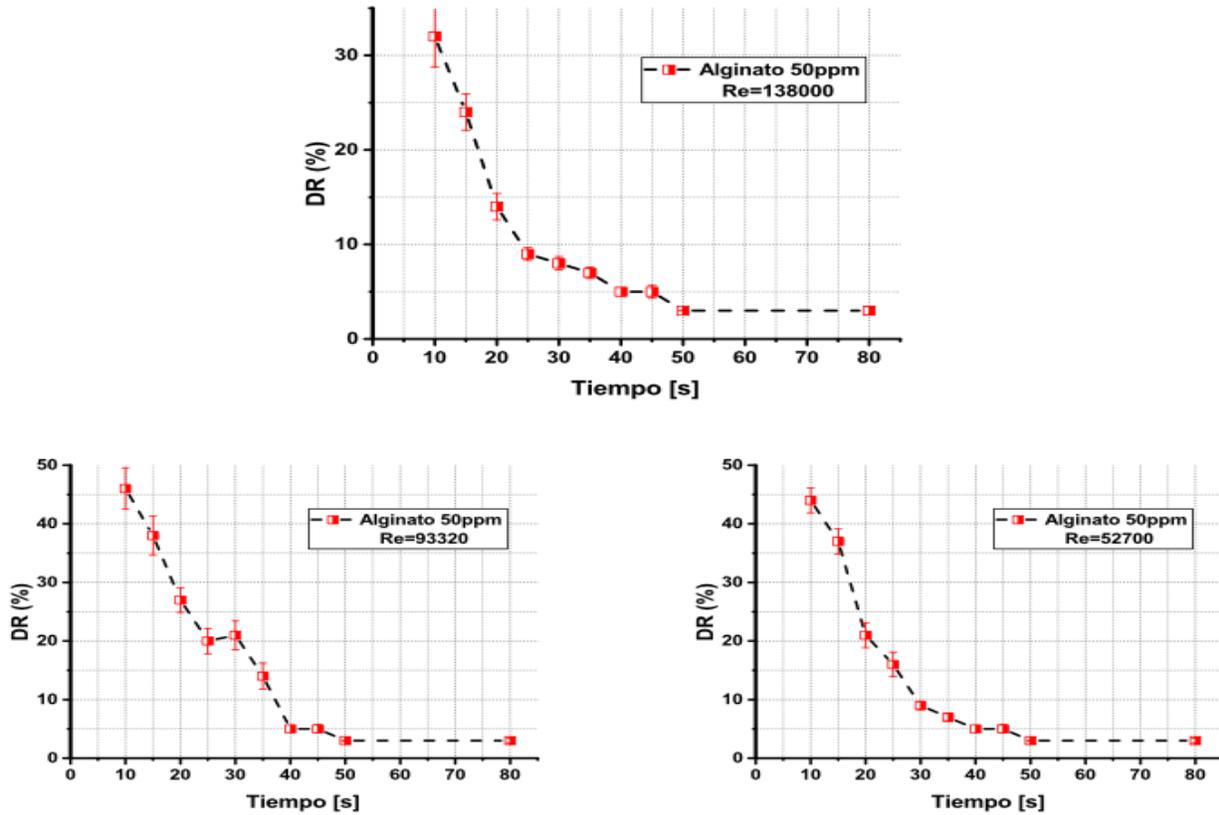
**Figura 6.** Comportamiento del PEO como DRA a tres diferentes valores de Reynolds con una concentración de 100ppm, como indica cada gráfica.

Se realizaron nuevos experimentos con el alginato, usando concentraciones de 50 y 100ppm y los mismos Re que con el PEO, la toma de datos se realizó cada 5 [s] buscando obtener posibles datos que no se habían observado en los intervalos de 20 [s].

Las Figuras 7 y 8 ofrecen nuevos resultados con respecto a los obtenidos en intervalos de 20 [s], estos nuevos resultados indican % de DR mayores a los PEO, para Re bajos y medios, mientras que el % de DR obtenido en Re altos es el menor.

Estos resultados muestran que efectivamente el intervalo de 20[s] era muy grande para el estudio del Alginato, el reducir el intervalo permitió observar que el Alginato es buena alternativa como DRA.

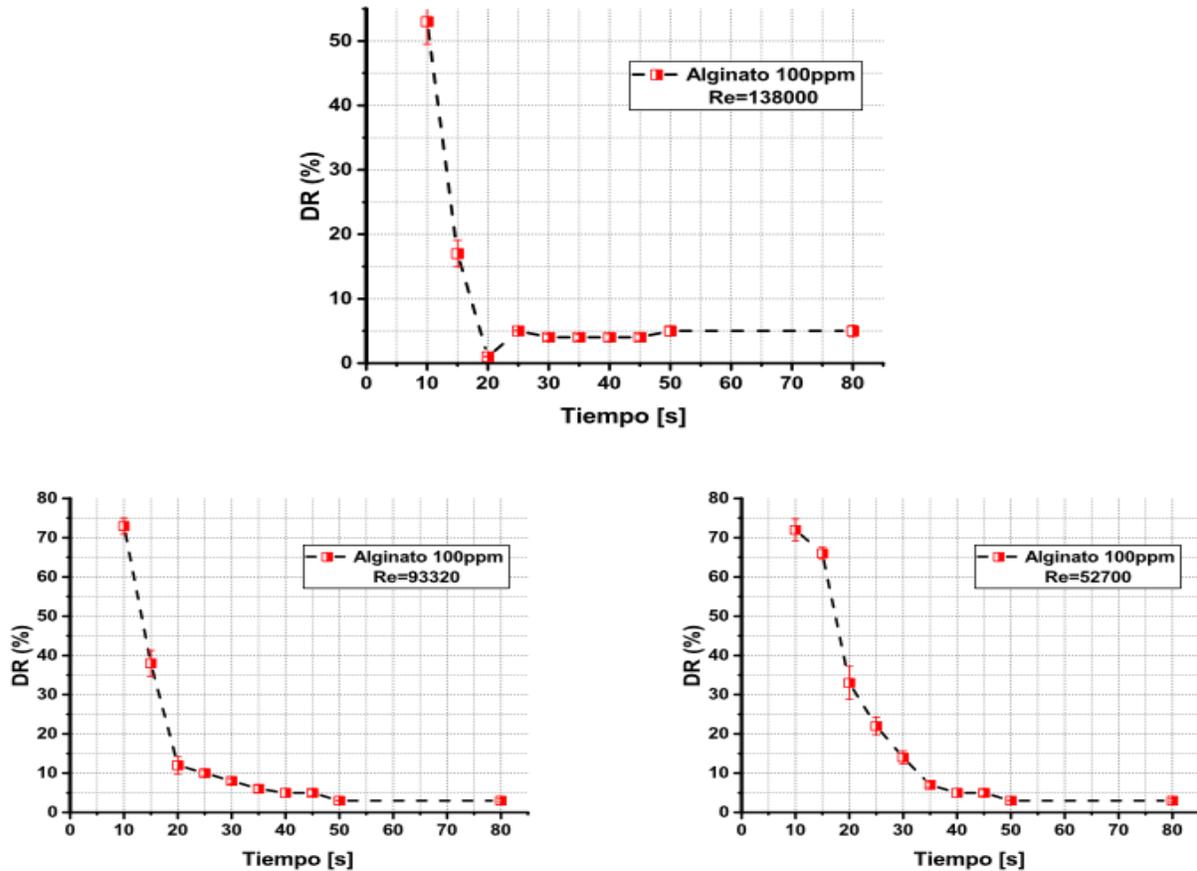
El Alginato ha presentado buenos % de DR máximos, sin embargo, no es muy eficiente para el sistema de estudio presente, ello debido una pronta disminución del máximo valor de %DR alcanzado. Este fenómeno se debe a que su peso molecular es mucho menor al del PEO estudiado, por lo que cadena es más corta lo que lo hace más susceptible a las degradaciones mecánicas en el sistema de estudio. Probablemente en un sistema que cuente con una bomba de disco la durabilidad del Alginato como DRA podría ser más extensa.



**Figura 7.** Comportamiento del Alginato como DRA a tres diferentes valores de Reynolds con una concentración de 50ppm.

A partir de estas figuras se confirma que el polímero se va “desenredando” hasta verse completamente estirado, en el instante que %DR alcanza su valor máximo. Como se puede verse en las Figuras 3, 4 y 5 para el PEO este instante se alcanza a los 80 [s].

Finalmente es importante destacar que el mayor % de DR se alcanza con 100ppm de concentración a Re medio, confirmando las hipótesis previamente analizadas, donde la mayor concentración presenta la mayor tasa del % de DR. Otro aspecto importante es que el mayor % de DR alcanzado se da en el Re medio (aunque la diferencia del % de DR entre el Re medio y el bajo es muy leve) con lo que se ratifica que los Re altos permiten una mejor difusión y “desenredamiento” del DRA polimérico.



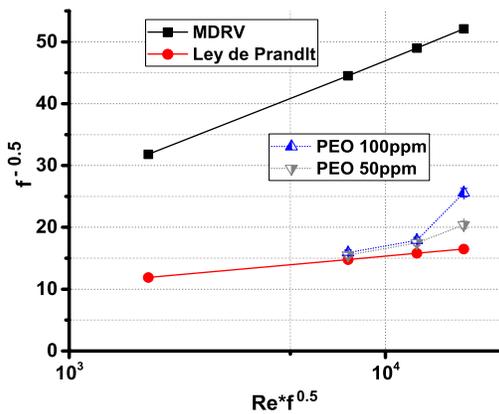
**Figura 8.** Comportamiento del Alginato como DRA a tres diferentes valores de Reynolds con una concentración de 100ppm.

Por último, la Figura 9 realiza una comparación de los máximos valores de  $f^*$  alcanzados en los Re bajos, medios y altos para el PEO y el Alginato. Es importante realizar estas gráficas de  $f$  en función de Re, para poder comprender mejor el efecto de los DRAs en cuanto a la fricción que se debería tener en ausencia de los mismos. Solo mediante los parámetros presentes en las Figuras 9.a y 9.b es posible ilustrar adecuadamente los efectos de la presencia del DRA en el flujo del fluido.

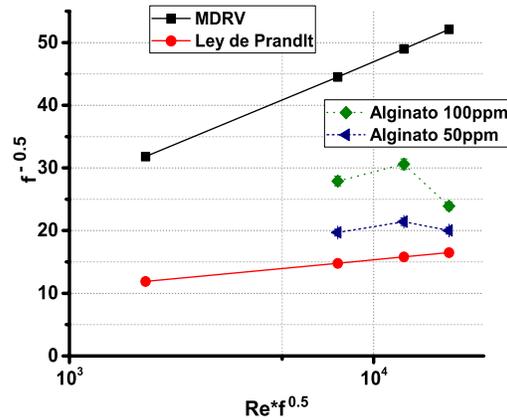
**Tabla 1.** Efecto del PEO a 50 y 100ppm con respecto al MDRV y a la ley de Prandtl.

Re	Re $f^{0.5}$	MDRV	Ley de Prandtl	PEO 100ppm		PEO 50ppm	
		$f$	$f$	$f$	$\sigma^2$	$f$	$\sigma^2$
10000	11.619	31.8	11.9	--	--	--	--
52700	15.561	44.5	14.8	15.9	0.44	15.5	0.43
93320	16.934	49.0	15.8	17.9	0.49	17.5	0.48
138000	17.877	52.1	16.5	25.6	0.71	20.4	0.57

\*Es importante recordar que el% de DR se calcula en función los valores de  $f$ . Este cálculo utiliza tanto los valores de  $f$  obtenidos en presencia del DRA, como en su ausencia.



a)



b)

Figura 9. a) Efecto del PEO en  $f$  y b) Efecto del Alginato en  $f$ .

Tabla 2. Efecto del Alginato a 50 y 100ppm con respecto al MDRV y a la ley de Prandtl.

Re	$Re f^{0.5}$	MDRV	Ley de Prandtl	Alginato 100ppm		Alginato 50ppm	
		$f$	$f$	$f$	$\sigma^2$	$f$	$\sigma^2$
10000	11.619	31.8	11.9	--	--	--	--
52700	15.561	44.5	14.8	27.9	0.77	19.7	0.54
93320	16.934	49.0	15.8	30.6	0.85	21.4	0.59
138000	17.877	52.1	16.5	23.9	0.66	20	0.55

La gráfica que corresponde al PEO muestra que a una concentración 100ppm y a Re alto se obtiene el valor más cercano al MDRV. Sin embargo, el valor alcanzado es muy distante del propuesto por Virk (1975). Mientras que la gráfica del Alginato muestra el mayor acercamiento a la MDRV a 100ppm, pero a Re medio y a Re alto este valor decae. Este hecho se debería a la diferencia del tamaño de cadena y al peso molecular con respecto al PEO (como se habría explicado anteriormente)

Al observar los valores máximos alcanzados con respecto al MDRV, los resultados indicarían que el Alginato sería una alternativa factible al PEO como DRA, en el caso de empleárselo a Re bajos o medios.

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se pudieron obtener las siguientes conclusiones:

- El PEO es un buen DRA a Re altos y su máximo %DR está en función el Re al que este es sometido.
- El Alginato es un buen DRA cuando se trabaja Re menores a 90000, siendo capaz de alcanzar fácilmente valores próximos al 80%DR. Es decir, el Alginato es una buena alternativa de DRA para reemplazar los DRAs sintéticas, ya que presenta un menor costo y es más amigable ambientalmente.
- El rango de Re define el comportamiento de los DRAs según a las características físicas de

los polímeros.

- Los esfuerzos cortantes de la turbulencia, como los esfuerzos mecánicos generados por el bombeo disminuyen abruptamente la eficiencia de los DRAs poliméricos.

Dados los resultados expuestos queda establecida la necesidad de encontrar una solución a la pronta degradación de los DRAs poliméricos, por lo que a futuro se probaran mezclas de polímeros con nanopartículas, generando nanofluidos, los cuales se espera presenten una mayor tolerancia a la degradación sin perder las características del polímero solo como DRA.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta investigación agradecen la colaboración de los Departamentos de: Ingeniería Civil e Ingeniería Química y Biotecnología, por brindar el espacio, materiales y personal para poder realizar el presente estudio, además del agradecimiento a Conicyt por financiar el Doctorando mediante la beca Doctorado Nacional 2014.

## REFERENCIAS

Choi, S. U., Cho, Y. I., & Kasza, K. E. (1992). Degradation effects of dilute polymer solutions on turbulent friction and heat transfer behavior. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 41(3), 289-307.

Den Toonder, J. M. J., Draad, A. A., Kuiken, G. D. C., & Nieuwstadt, F. T. M. (1995). Degradation effects of dilute polymer solutions on turbulent drag reduction in pipe flows. *Applied Scientific Research*, 55(1), 63-82.

Gyr, A., & Bewersdorff, H. W. (1995). Drag reduction of turbulent flows by additives (Vol. 32). Springer Science & Business Media.

Lumley, J. L. (1969). Drag reduction by additives. *Annual review of fluid mechanics*, 1(1), 367-384.

McAbe W.L. and J. Smith Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, volume I. Reverté, 1973.

Sreenivasan, K. R., & White, C. M. (2000). The onset of drag reduction by dilute polymer additives, and the maximum drag reduction asymptote. *Journal of Fluid Mechanics*, 409, 149-164.

Virk, P. S. (1971). An elastic sublayer model for drag reduction by dilute solutions of linear macromolecules. *Journal of Fluid Mechanics*, 45(3), 417-440.

Virk, P. S. (1975). Drag reduction fundamentals. *AIChE Journal*, 21(4), 625-656.

Warholic, M. D., Massah, H., & Hanratty, T. J. (1999). Influence of drag-reducing polymers on turbulence: effects of Reynolds number, concentration and mixing. *Experiments in fluids*, 27(5), 461-472.

White, C. M., & Mungal, M. G. (2008). Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 40, 235-256.

Ferdinand Rodriguez and Charles Winding. Mechanical degradation of dilute polyisobutylene solutions. *Industrial & Engineering Chemistry*, 51(10):1281-1284, 1959.