

Método para el Control Activo de la Turbulencia. Una mirada histórica. (Parte I)

G. Vilalta Alonso*, J.P. Ortiz**

*ISPJAE, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables,
Facultad de Ingeniería Mecánica, La Habana, Cuba, CP 19 390,
e-mail: gvilalta@ceter.cujae.edu.cu

**Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica de la USP,
CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil, e-mail: jportiz@usp.br

(Recibido el 14 de Abril de 2004, aceptado el 8 de Septiembre de 2004).

Resumen

El presente trabajo es un estudio bibliográfico del conocido *fenómeno Toms*. La adición de polímeros a los flujos de solvente (generalmente Newtonianos) provoca que estos pasen a tener un comportamiento interesante y no pocas veces mal interpretado. Por la complejidad del tema, la diversidad de sistemas poliméricos y por limitaciones de tipo experimental varias teorías tratan de explicar por que en estos fluidos ocurre una disminución de las pérdidas hidráulicas. Algunas teorías abordan la discusión desde el punto de vista de la dinámica de los fluidos estableciendo que los polímeros causan significativas alteraciones en la estructura de los flujos turbulentos con modificaciones importantes en los procesos de transferencia de energía entre la región de pared y el núcleo turbulento del flujo

Palabras Claves: Turbulencia, polímeros, pérdidas hidráulicas, estructura de la turbulencia.

1. Introducción.

La reducción de las pérdidas hidráulicas debido a la adición de polímeros se ha presentado a la comunidad científica como un gran misterio desde la década de 1940, cuando Toms (1948) presentó las primeras evidencias sobre este fenómeno. Sus resultados mostraron que soluciones de polimetilmetacrilato en monoclorobenceno necesitaban menor energía que el solvente puro para fluir. Otros trabajos posteriores confirmaron este fenómeno el cual es conocido en la literatura como *fenómeno Toms*.

A finales de los años 60, la reducción de las pérdidas hidráulicas debido a la adición de polímeros comenzó a ser estudiada fenomenológicamente. Paralelamente a las investigaciones sobre la turbulencia en flujos Newtonianos, los científicos necesitaban avanzar en la explicación del mecanismo físico responsable por este fenómeno. A pesar del desarrollo de nuevas técnicas de visualización y mapeado de flujos y de instrumentos de medición de última generación, todavía hoy, no existe consenso de cual es la influencia real de los polímeros sobre la estructura de la turbulencia.

La literatura técnica registra dos abordajes para el estudio de la reducción de las pérdidas hidráulicas debido a la adición de polímeros:

1. Abordaje de la dinámica de los fluidos, que considera las modificaciones que ocurren en la estructura de los flujos turbulentos cuando se les adicionan polímeros

2. Abordaje molecular, el cual estudia el comportamiento y modificaciones que ocurren en las moléculas de polímeros dentro del campo de flujo y como este puede llevar a la disminución de las pérdidas hidráulicas,

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo constituye la primera parte de un amplio estudio sobre el estado del arte en el tema de referencia, donde se presentan los principales resultados de aquellas investigaciones que confirman que los polímeros provocan modificaciones en la estructura de los flujos turbulentos.

2. Abordaje de la Dinámica de los Fluidos.

Por su propia naturaleza, definir la estructura de los flujos turbulentos es muy complejo. Dos métodos han sido utilizados para estudiarla. El primero es el de la visualización (y más recientemente de mapeado) del campo de flujo. El segundo se basa en la medición experimental de las principales magnitudes turbulentas a través de sistemas de anemometría, fundamentalmente

de la anemometría láser. Más recientemente, las técnicas numéricas han pasado a tener un peso muy importante en estas investigaciones.

Dos hipótesis (Tiederman et al 1985 y Vilalta & Ortiz 1997) intentan explicar la disminución de las pérdidas hidráulicas a través de la dinámica de los fluidos.

- Hipótesis de la sub-capa viscosa (S.C.V.);
- Hipótesis de la sub-capa intermedia (S.C.I.).

3. Hipótesis de la Subcamada Viscosa (S.C.V.).

Esta hipótesis establece que el polímero actúa en la SCV, donde el número adimensional de Reynolds, $Y^+ < 5+7$, siendo la causa de la disminución de las pérdidas hidráulicas, el proceso de inhibición de la formación de las estrías típicas de esta región. Solo algunas publicaciones defienden esta hipótesis.

Para los estudios de la turbulencia de forma general y de la reducción de las pérdidas hidráulicas particularmente, un avance significativo lo constituyó la definición de la existencia de una estructura de coherencia en la capa límite turbulenta presentada por Kline et al (1967). Utilizando un método de visualización de flujo a través de burbujas de hidrógeno en un canal, los autores revelaron la presencia de movimientos espaciales y temporales muy bien organizados. Estos movimientos llevan a la formación de una estructura de estrías de baja velocidad en la región de pared, la que interactúa con la región externa del flujo a través del siguiente proceso: alejamiento gradual, rápida oscilación, colapso y eyección.

El efecto del flujo al aproximarse o alejarse de a pared es un encurvamiento, como se muestra en la figura 1.

Este efecto de encurvamiento debe actuar en sentido de alterar la componente transversal de la vorticidad, provocando su estiramiento o su compresión. Como la componente transversal de la vorticidad es debida,

fundamentalmente a $\partial u' / \partial y$, estos procesos de estiramiento y compresión deben conducir a variaciones de la componente fluctuante axial de la velocidad, u' próximos de la pared. Donde el flujo se está aproximando a la pared la componente transversal de la vorticidad debe actuar en sentido de incrementar el valor de u' . Donde el flujo está alejándose, u' debe disminuir debido al efecto de compresión de las líneas de vórtices. Es esta variación de u' , la que provoca la formación de regiones de alta y baja velocidad que se mueven a lo largo del contorno sólido, siendo esta configuración definida como estría.

La figura 2 muestra el mecanismo de colapso de las estrías. Los elementos de vórtices estirados se alejan de la región de pared entrando en una capa de tensiones locales dinámicamente inestables lo que provoca el colapso de las mismas y la interacción de estructuras típicas de la región de pared con o núcleo turbulento.

La importancia de la etapa de erupciones es que, de acuerdo con Kim *et al* (1971), aproximadamente 70% de la energía cinética turbulenta es producida durante la ocurrencia de estas erupciones.

Los parámetros básicos de una estría son:

Espaciamiento adimensional de las estrías (λ^+);

Tasa de erupciones (F);

Tiempo entre erupciones (T_B).

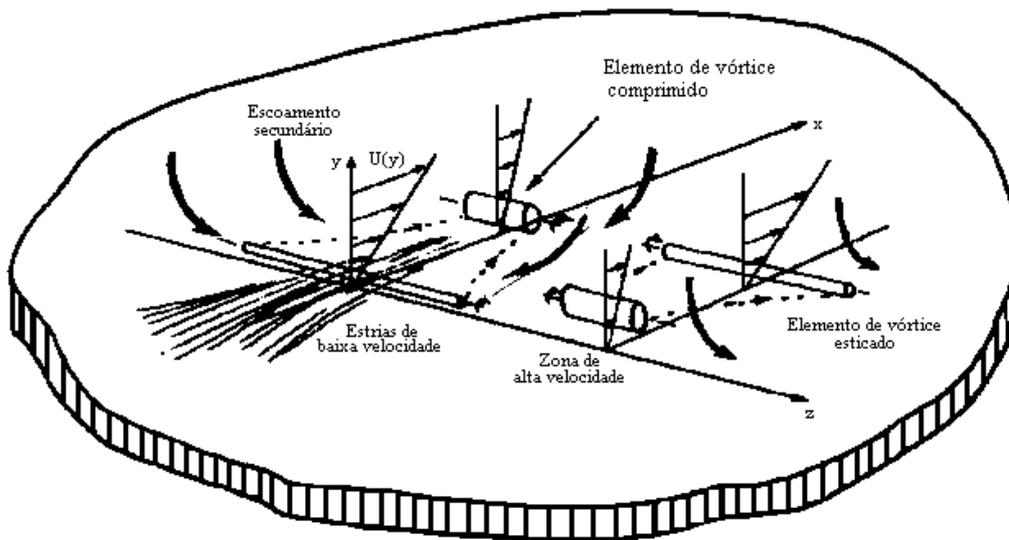


Figura 1. Mecanismo de formación de las estrías. (Tomado de Kline *et al*, 1967).

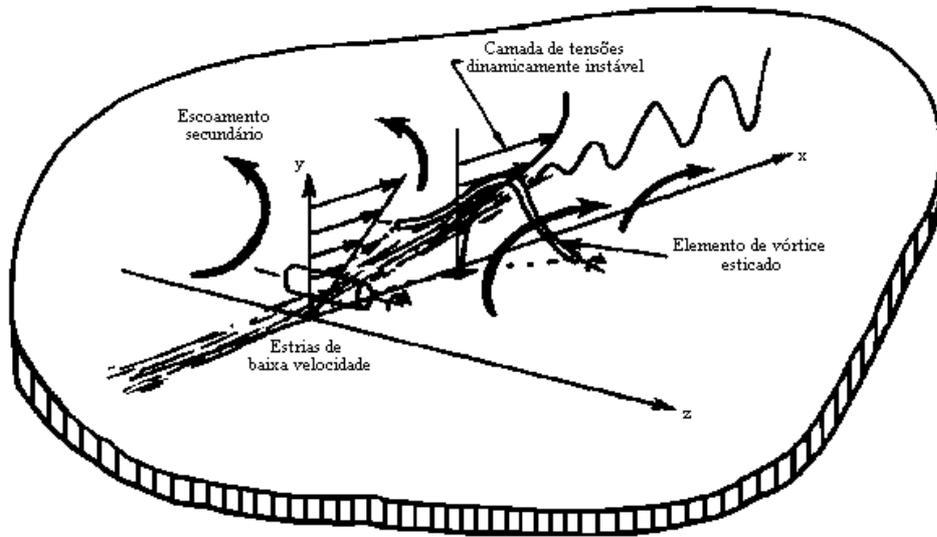


Figura 2. Mecanismo de colapso das estrías. Tomado de Kline *et al* (1967).

De forma general el análisis de estos parámetros es realizado a través de estudios visuales de la sub-capa viscosa en los flujos turbulentos.

Las principales modificaciones que ocurren en estos parámetros debido a la adición de polímeros, pueden ser resumidas de la siguiente manera:

Espaciamento adimensional de las estrías (λ^+): el espaciamento de la estría λ es interpretado como una medida de las menores escalas en la dirección transversal. Frecuentemente su análisis se realiza como parámetro adimensionalizado con las variables internas, velocidad de fricción, u_* y la viscosidad ν pudiendo ser calculada por la relación

$$\lambda^+ = \lambda u_* / \nu \tag{1}$$

Su valor para flujos Newtonianos es de una orden de 100 ± 20 .

La literatura ha indicado una tendencia de mayores valores de λ^+ para soluciones poliméricas cuando se comparan con el valor de los flujos Newtonianos. La relación de λ^+ con el coeficiente de eficiencia de reducción de las pérdidas hidráulicas ϕ y u_* es poco nítida, habiendo sido objeto de varios trabajos, siendo que las diferencias mostradas corresponden al grado de desarrollo de los métodos de visualización utilizados.

Por ejemplo, Fortuna & Hanratty (1972), Donoheu *et al* (1972) e Achia e Thompson (1972), utilizando diferentes métodos, obtuvieron variaciones que van desde modestos a grandes incrementos de λ^+ con el aumento de ϕ y de la velocidad de atrito, u_* .

Utilizando un método de visualización por inyección de colorante en un canal bi-dimensional, Donohue *et al*

(1972) hicieron un estudio para determinar si la adición de polímeros alteraba la estructura de la sub-capa viscosa y consecuentemente los procesos de producción de energía cinética turbulenta.

La figura 3 muestra los resultados obtenidos comparándolos con los resultados de otros trabajos. Se observa en la figura que todos los resultados conducen a un aumento de la distancia entre estrías con el aumento de ϕ .

Las diferencias entre los resultados son atribuidas a dos factores fundamentales: utilización de diferentes combinaciones polímero-solvente y diferentes interpretaciones de los parámetros estadísticos en la evaluación de λ^+ .

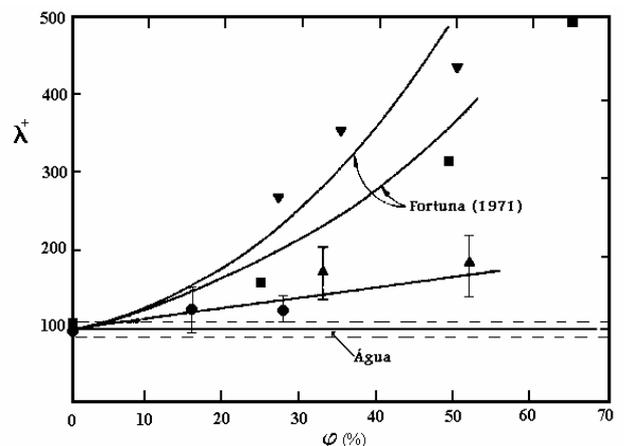


Figura 3. Efecto de ϕ sobre λ^+ .

■ Eckelman *et al* (1972); ▼ Fortuna & Hanratty (1972); ▲ e ● Donohue *et al* (1972)

Fortuna & Hanratty (1972) utilizaron técnicas electroquímicas y herramientas estadísticas para estudiar la influencia de polímeros sobre λ^+ , análisis hecho a través de la determinación del coeficiente de correlación (R_x). Éste fue calculado para diferentes valores de φ y del número de Reynolds, Re ($\varphi=27\%$, $Re=27\ 600$; $\varphi=34,6\%$, $Re=27\ 600$ y $\varphi=49,3\%$, $Re=39\ 200$). Sus resultados mostraron que el coeficiente de correlación axial es mayor para las soluciones poliméricas que para el solvente, indicando que las escalas en esta dirección aumentan debido a la adición de polímeros.

El valor de λ^+ a partir R_x de es determinado tomando dos veces la distancia entre el primero y el segundo cero de la función de correlación, verificándose una tendencia similar a que se destaca encima.

Oldaker & Tiederman (1977), por otro lado, estudiaron la estructura espacial de la sub-capa viscosa en flujos polímeros, inyectando colorante a través de hendiduras existentes en la pared del canal. El parámetro escogido por los autores para el análisis, fue la relación entre el gasto de fluido de colorante y el gasto en la sub-capa viscosa, M_c . Para flujos de soluciones poliméricas y $1/12 > M_c > 1/37$, los resultados indican un crecimiento casi lineal de λ^+ con φ , siguiendo la relación:

$$\lambda^+ = 1,9(\varphi) + 99,7 \quad (2)$$

Otro resultado importante obtenido por estos autores es la relación entre λ^+ y φ para diferentes valores de Y^+ los que se muestran en la figura 4. Para $Y^+ > 2$ la tendencia de crecimiento de λ^+ con φ es casi lineal. Para $Y^+ < 2$ la tasa de crecimiento es mucho más rápida. Este resultado sirve para explicar las diferencias en los resultados de Donohue *et al* (1972) y Eckelman *et al* (1972) (ver figura 3). Oldaker & Tiederman (1977) consideran que las discrepancias se deben a que las mediciones fueron realizadas en diferentes regiones dentro de la sub-capa viscosa, o sea, sin considerar el número de Reynolds adimensionado, proponiendo que para representar la variación de λ^+ versus φ sea escogido el valor correspondiente a $\lambda^+ > 2$.

La tabla 1 muestra, como ejemplo, algunos de los resultados obtenidos en la determinación de λ^+ , como

función del coeficiente, φ y de la concentración de las soluciones poliméricas, C_w .

Tasa de erupciones (F):

El proceso de erupciones se refiere a la secuencia de eventos envueltos en la eyección de fluido de la región de pared para la región del núcleo turbulento y está asociado al conteo de las eyecciones que ocurren por erupciones siendo que el valor determinado para los flujos Newtonianos es $F=2$ eyecciones por erupciones, de acuerdo con Tiederman *et al* (1977).

Los trabajos iniciales de Donohue *et al* (1972) y Achia & Thompson (1977) utilizaron el método de Kline *et al* (1967) para determinar la tasa de erupciones en soluciones poliméricas homogéneas, el cual consiste en el conteo de todas las erupciones que ocurren en un fluido marcado que penetra en la región de pared a través de una pequeña hendidura transversal.

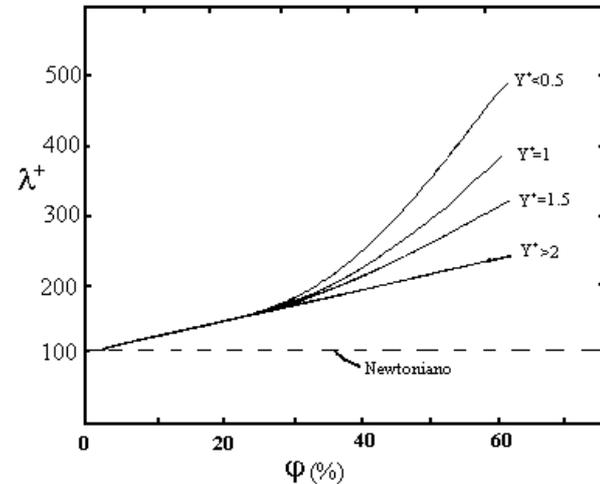


Figura 1. (2.3) Influencia de Y^+ en la relación de λ^+ versus φ

Una característica de este método es que para que se puedan observar todas las erupciones es necesario un campo de visual axial suficientemente grande (para flujo de agua es de una orden grandeza de $100 < x^+ < 1500$, siendo x^+ la distancia axial adimensionada aguas debajo de la hendidura de inyección).

Tabla 1 Relación entre λ^+ , C_w y φ

Trabajo	Determinación visual	Ajuste de curvas (mínimos cuadrados)
Oldaker & Tiederman (1977)	s.p $C_w = 50$ ppm, $\lambda^+ = 169$ ($\varphi=24\%$) s.p $C_w = 100$ ppm, $\lambda^+ = 175$ ($\varphi=44\%$)	$\lambda^+ = 1.9(\varphi) + 99.7$
Tierdeman <i>et al</i> (1985)	s.p $C_w = 100$ ppm, $\lambda^+ = 124$ ($\varphi=22\%$) s.p $C_w = 200$ ppm, $\lambda^+ = 150$ ($\varphi=27\%$)	$\lambda^+ = 2.01(\varphi) + 90.4$

De esta forma el fluido marcado para que sea efectivamente contado, debe haber penetrado en la estría antes del proceso de eyección del fluido para la región externa del flujo. Una dificultad para la obtención de información precisa es que con el incremento de la distancia aguas debajo de la hendidura se torna más difícil el proceso de detección experimental de nuevas erupciones. La literatura registra valores de $x^+ = 1000-2000$, que para el caso de los flujos Newtonianos es adecuado pero, como fue demostrado por Tiederman *et al* (1977), para soluciones poliméricas probablemente no es suficiente.

Otro método para determinar el valor de F , utilizando visualización de flujo a través de una sustancia colorante inyectada por hendiduras, fue empleado por Tiederman *et al* (1985), el cual se basa en el concepto de que, aunque la tasa de erupciones aumente a partir de cero y que con el incremento de la distancia axial ésta pudiera eventualmente disminuir, la tasa real de erupciones no debe ser una función de x^+ en flujos totalmente desarrollados. De aquí, si hay una región axial donde el fluido inyectado a través de las hendiduras en la pared marca todas las erupciones, entonces esta región estaría definida por un máximo en el número de eyecciones por unidad de tiempo.

Los resultados de la aplicación de este método se han mostrado razonablemente precisos. Mediante su utilización, los autores obtuvieron un valor medio de 3,45 eyecciones por erupción en los flujos de soluciones poliméricas con valores de concentración de 20-50 ppm. Los resultados difieren de aquellos encontrados para baja concentraciones (1-2 ppm) por Luchick & Tiederman (1988). Para soluciones homogéneas y de pequeña concentración, la tasa de eyecciones por erupciones cae para 2,3-2,5. Esta diferencia puede indicar que, para C_w pequeño, el mecanismo a través del cual los polímeros son efectivos es diferente de aquel que ocurre para altos valores de C_w o que el perfil de concentraciones puede producir algún tipo de flujo donde los mecanismos turbulentos todavía no alcanzaron el estado de equilibrio.

Los resultados generales indican que la tasa de erupciones para flujo de soluciones poliméricas es mayor que para el flujo de solvente. Una característica importante de estos resultados es que la disminución de F es mayor que el incremento en el espaciamiento transversal de las estrías. Estos resultados coinciden con los de McComb & Rabie (1982) pero difieren de los de Donohue *et al* (1972) y Achia & Thompson (1977).

Tiempo medio entre erupciones (T_B): Considerado como el tiempo entre dos erupciones consecutivas en una misma estría individual. Por su importancia es considerado como uno de los principales parámetros en el contexto del fenómeno en estudio, ya que el proceso de erupción turbulenta puede controlar la difusión de los

polímeros de la región de pared hacia la región del núcleo turbulento. Puede ser determinado por la relación:

$$T_B = 1/F\lambda. \quad (3)$$

Los resultados generales muestran que T_B para las soluciones poliméricas es mayor que para los flujos Newtonianos. Achia & Thompson (1972), con auxilio de métodos holográficos en tiempo real y McComb & Rabie (1982) utilizando funciones de autocorrelación obtuvieron resultados cualitativamente semejantes.

Es importante destacar que el trabajo de Luchick & Tiederman (1988) ha sido citado aquí por las características propias de los estudios que realizaron, cuyos resultados ayudan a interpretar las modificaciones en la estructura de la S.C.V., aunque en sus conclusiones, los autores atribuyen la disminución de las pérdidas hidráulicas a las modificaciones en la sub-capas intermedia.

De los trabajos analizados se llega a la conclusión que el proceso de producción turbulenta ocurre a través de una secuencia de eventos siendo los aspectos más importantes: formación, alejamiento, incremento o crecimiento oscilatorio y colapso de las estrías de baja velocidad, lo que es seguido por un evento de "sweep". Se considera entonces que para que los polímeros afecten la producción turbulenta sería necesario romper esta secuencia, resultando por lo tanto una nueva secuencia ajustada a las nuevas condiciones de equilibrio.

Una limitación al estudio de las estructuras de coherencia en flujos de soluciones poliméricas, es la incapacidad de explicar, cualitativamente, por que la frecuencia de las erupciones disminuye al incrementarse el espaciamiento de las estrías. Del análisis del método visual, por ejemplo, no es posible concluir que en todos los casos de reducción de arrastre, λ sea afectada de la misma forma. Tampoco es posible predecir las varias formas de suprimir las erupciones que pueden ocurrir después de la formación de las estrías y cual es la importancia de cada una de ellas.

El conjunto de las modificaciones hasta aquí analizadas muestran que, en base de los resultados obtenidos, los polímeros provocan modificaciones en la estructura de la S.C.V. las que pueden ser resumidas:

- Inducen a un proceso de estabilización de esta región.
- El elemento característico de esta región es una estructura de estrías que es provocada por variaciones transversales de la componente fluctuante axial de la velocidad, u' . La adición de polímeros inhibe la formación de estas estrías.
- Debido a esto disminuyen las erupciones e ellas asociadas.

- Consecuentemente la producción de turbulencia disminuye en la S.C.I.
- Ocurren alteraciones en el proceso de transferencia de energía entre las regiones interna y externa del flujo.

4. Hipótesis de Subcapa Intermediaria (S.C.I).

Esta hipótesis establece que las moléculas de polímeros actúan en la región de la Sub-capas Intermediaria ($10 < Y^+ < 70$).

La acción de los polímeros provoca variaciones en el balance de energía (producción y disipación) en los flujos turbulentos, las que son generalmente analizadas a partir de los principales parámetros turbulentos y mediante la utilización de herramientas estadísticas. Siendo los flujos turbulentos altamente aleatorios, es importante conocer como las fluctuaciones están distribuidas alrededor del valor medio.

El desarrollo de modernos instrumentos de medición de velocidad utilizando medios ópticos, ha aumentado la confiabilidad de las mediciones. El sistema de anemometría Láser (L.D.A), por ejemplo, no perturba las mediciones en el campo de velocidades ya que el sensor (volumen del cruzamiento de los rayos) es no intrusivo y altamente preciso. Por otro lado, el desarrollo de técnicas de medición escalar y vectorial del campo instantáneo de velocidades, como por ejemplo la tomografía interferométrica, imagen por resonancia magnética nuclear y la utilización de sistemas tipo P.I.V (Adrian, 1991), han prestado gran contribución en la interpretación del proceso de turbulencia de pared.

Se analizan, a continuación, las modificaciones que ocurren en el campo de velocidades turbulentas.

Intensidad de la turbulencia.

Es definida como la raíz media cuadrática (RMS) de las fluctuaciones de cualquiera de las componentes de la velocidad y puede ser determinada por la ecuación general:

$$\sigma_i = \sqrt{u_i'^2} = \int_{-\infty}^{\infty} u_i'^2 P(u_i') du_i' \quad (4)$$

$P(u_i')$ la función de densidad de probabilidad, o sea, la probabilidad de encontrar $u_i'(t)$ entre u_i' y $u_i' + \Delta u_i'$. El término u_i' se refiere a cualquiera de las componentes fluctuantes de la velocidad.

Comúnmente en los trabajos analizados se presentan mediciones de la intensidad turbulenta de las fluctuaciones de las componentes de la velocidad en las direcciones axial, u' y normal a la pared, v' , así como,

de las tensiones de Reynolds, $-\langle u'v' \rangle$, asociadas a las fluctuaciones.

Perfil de intensidad turbulenta axial, u'/u_* .

El perfil de intensidad turbulenta de las componentes de la velocidad ha sido medido para una gran variedad de sistemas poliméricos. Uno de los primeros estudios sobre el perfil de intensidad turbulenta en flujos de soluciones poliméricas es el trabajo de Virk et al (1967), los que utilizaron un tubo de Pitot y anemómetro de hilo caliente para medir la componente axial para diferentes sistemas poliméricos. Una limitación a la generalización de los resultados obtenidos es el hecho que las mediciones de la estructura de la turbulencia fueron hechas para un valor único de gasto. Los resultados mostraron que en la región donde $r/R = \xi < 0,4$, los perfiles del solvente y de las soluciones poliméricas son esencialmente iguales siendo que para el rango $0,4 < \xi < 1,0$ las soluciones presentan mayores valores de intensidad turbulenta con diferencias máximas de 20% en el eje de la tubería. Es importante destacar que Virk et al adoptaron el origen del eje en la pared.

Como contribución importante en este trabajo se propone el concepto de Asintota de Máxima Reducción (A.M.R.A). Este valor es definido como el límite a partir del cual incrementos en la concentración del polímero no producen mayores disminuciones en la resistencia hidráulica. La ecuación que define esta región es:

$$\frac{I}{\sqrt{f}} = 19,0 \log_{10} Re \sqrt{f} - 32,4 \quad (5)$$

Las primeras mediciones del perfil de intensidad turbulenta utilizando L.D.A. fueron reportadas por Rudd (1971) y Logan (1972). En ambos casos fueron utilizados conductos rectangulares, de iguales dimensiones, obteniéndose que u'/u_* se incrementaba en la región de pared, $Y^+ < 100$ para flujo de soluciones poliméricas. La existencia de flujos secundarios debido a la forma geométrica de la sección empleada lleva a cuestionamientos sobre la relevancia de estos resultados al aplicarse a flujos en tuberías.

Por ejemplo, en canales, que pueden ser considerados como conductos cuadrados con una relación de aspecto muy grande, Reischman & Tiederman (1975) encontraron que sus resultados diferían sustancialmente con los encima mencionados [apud McComb & Rabie (1982)].

McComb & Rabie (1982), estudiaron la influencia del punto de inyección de las soluciones poliméricas (inyección por hendiduras en las paredes y/o en el eje) sobre la disminución local de las pérdidas hidráulicas. Los resultados obtenidos no definieron ninguna

tendencia de este parámetro sobre la intensidad turbulenta axial.

La figura 5 muestra los resultados obtenidos por estos autores, donde es posible de observar que la posición de los máximos de intensidad turbulenta para soluciones poliméricas están en el intervalo $Y^+=60\div 80$. Se observa también que el valor de máxima intensidad, para flujo Newtoniano, está más próximo de la pared si se compara con el de polímero. Para estos últimos se observa que la región en análisis es más ancha. Se destaca que las curvas fueron obtenidas para diferentes posiciones aguas abajo del punto de inyección, lo que significa diferentes valores del coeficiente ϕ . Resultados similares fueron obtidos por Luchik & Tiederman (1988), Usui et al (1988) y Wei & Willmarth (1992).

Wei & Willmarth (1992) destacan que, a pesar de la adición de polímeros provocar incrementos en los valores del perfil de intensidad turbulenta axial para las soluciones poliméricas, para estos flujos los valores de la componente u' no son mayores que para agua. Esto se debe a que, la velocidad de fricción disminuye.

Los máximos valores en los perfiles de intensidad turbulenta para flujo de soluciones poliméricas ocurren para la faja $10 < Y^+ < 70$, o sea, en la S.C.I. Esto significa que existe un desplazamiento de la producción de turbulencia para las regiones más alejadas de la pared, como puede ser visto en la Figura 5.

Perfil de intensidad turbulenta normal, v'/u_* .

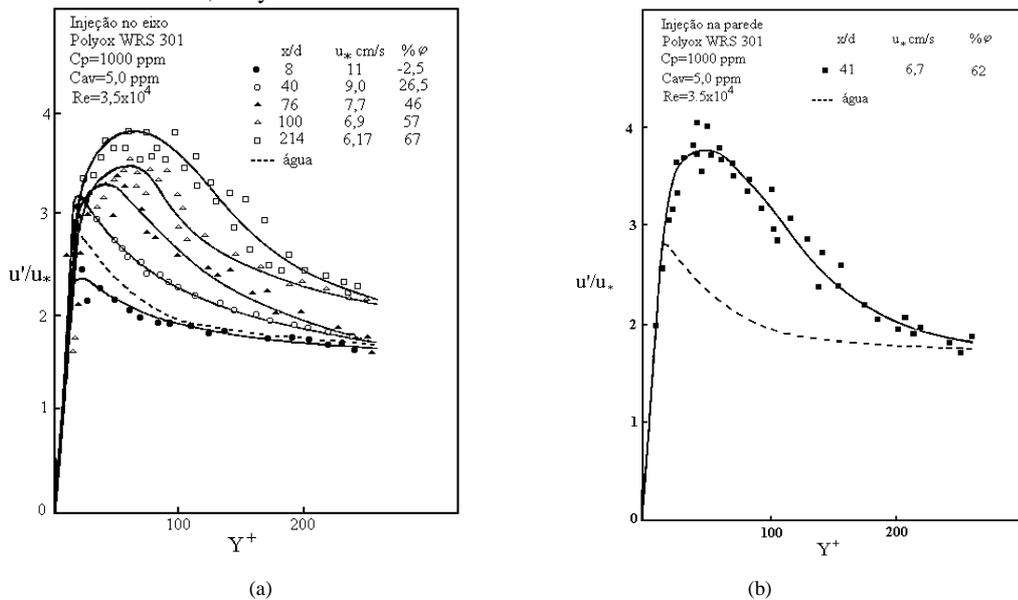
Fue a partir de 1985 que comenzaron a ser publicados los primeros trabajos que incluyen la medición de la componente fluctuante normal, v' y consecuentemente

de su perfil de intensidad turbulenta. Esto coincide con el inicio de la utilización de los sistemas de anemometría láser.

Los trabajos de Luchik & Tiederman (1988), Usui et al (1988), Pinho & Whitelaw (1990), Wei & Willmarth (1992) y Sá Pereira & Pinho (1994) presentan mediciones de la componente v' cuya característica general en la región de pared, $Y^+ < 100$, es el amortiguamiento del su perfil de intensidad turbulenta. Estudiando este fenómeno cuando el polímero es inyectado en el eje de la tubería, llamadas soluciones heterogéneas, Usui et al (1988), obtuvieron que el amortiguamiento del perfil de intensidad turbulenta en la fase polímero es mucho mayor que en la fase agua. Debe recordarse que para el flujo de soluciones heterogéneas, al no haber mezcla de polímero con el solvente, se definen dos fases: fase agua (o solvente) y fase polímero.

Al ser comparadas, para un mismo valor de concentración, las soluciones poliméricas no mezcladas presentan un amortiguamiento más significativo que las soluciones homogéneas. En ambos casos el comportamiento de esta componente tiende a una relaminarización del flujo.

Como será visto posteriormente, el comportamiento de esta componente tiene gran importancia en la modificación de las tensiones de Reynolds y consecuentemente en la disminución de la transferencia de cantidad de movimiento en la dirección transversal, en los flujos de soluciones poliméricas.



(a) (b)
 Figura 5. Perfil de intensidad turbulenta axial mostrando un desplazamiento de la zona de producción para puntos más alejados de la pared.
 (a) inyección en el eje, (b) en la pared.

Resultados similares fueron obtenidos por Wei & Willmarth (1992). Los valores de v'/u_* para soluciones Óxido de Polietileno (P.E.O.) son amortiguados en el intervalo $Y^+ < 100$, con disminuciones de 15 % con respecto al agua. Esto significa que, considerando los valores de la velocidad de fricción, el valor máximo adimensionado de v' para las soluciones poliméricas es 30 % menor que el correspondiente para el solvente. Los valores máximos de amortiguamiento fueron obtenidos en el rango $Y^+ \approx 4-6$ con valores que llegan al 50% de disminución.

Perfil de las tensiones de Reynolds. $-\langle \overline{u'v'} \rangle$.

Los primeros análisis de este término coinciden con el inicio de los estudios de los perfiles de intensidad turbulenta en las direcciones axial y normal a la pared. La importancia del estudio de este parámetro es su influencia en el transporte de cantidad de movimiento. La figura 6 muestra el comportamiento de las tensiones de Reynolds para soluciones poliméricas, pudiéndose observar la disminución de estos valores en relación con los del solvente, además de la existencia de valores negativos en posiciones muy próximas de la pared.

Conforme Wei & Willmarth (1992) entre otros autores, este comportamiento no puede ser solamente asociado a la disminución de la componente v' sino también, a la pérdida de la correlación entre u' y v' . En flujos Newtonianos en tuberías y canales, las tensiones de Reynolds pueden ser determinadas substrayendo las tensiones de cizallamiento medias del gradiente de presiones. A partir del balance de cantidad de movimiento, las tensiones de Reynolds pueden ser determinadas por la relación.

$$-\frac{\langle \overline{u'v'} \rangle}{u_*^2} = \left[1 - \frac{y}{h} \right] - \left(\frac{\partial U^+}{\partial Y^+} \right) \quad (6)$$

Willmarth et al (1987) determinaron las tensiones de Reynolds por dos métodos: a través de la medición directa, utilizando L.D.A, de las fluctuaciones u' y v' y por medio de la ecuación (6). Sus resultados mostraron que las tensiones de Reynolds para agua, calculada por ambos métodos presentaron buena coincidencia. No obstante los resultados utilizando el mismo procedimiento para soluciones poliméricas (POLYOX) mostraron que las Tensiones de Reynolds calculadas por medición directa de u' y v' no eran iguales a las determinadas por la ecuación (6). Estas diferencias se muestran en la figura 6, que indica que en cualquier sección del canal la tensión de cizallamiento total es la suma de las tensiones viscosas, $\mu \partial u / \partial y$, más las tensiones de Reynolds, $-\rho \langle \overline{u'v'} \rangle$, más una tensión adicional, de origen desconocida, cuyo valor es

aproximadamente la mitad de las tensiones de Reynolds medidas por el L.D.A.

Todavía hoy no existe una clara definición e interpretación sobre las características de esta tensión adicional, siendo la misma objeto de varios análisis recientes

Usui *et al* (1988) sugieren, por ejemplo, la existencia de otro mecanismo de transporte de la cantidad de movimiento, el cual no puede ser análogo a los mecanismos de transporte viscoso y de las tensiones de Reynolds.

Wei & Willmarth (1992), que obtuvieron resultados semejantes, confirman que, en flujos Newtonianos, el método de medición del gradiente de velocidad para determinar las tensiones de Reynolds es suficientemente preciso lo que permite su uso en el intento de determinar la influencia de los polímeros sobre las tensiones de Reynolds.

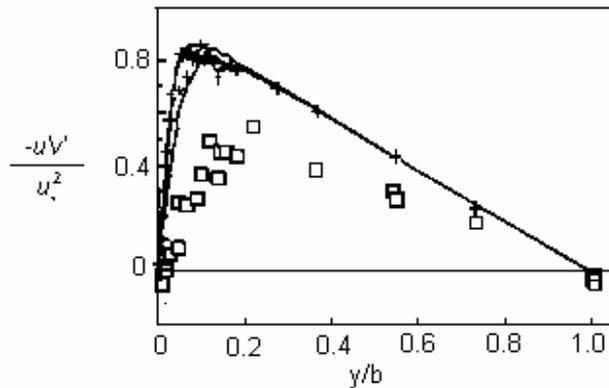


Figura 6. Perfil de las tensiones de Reynolds para solvente (+) y soluciones poliméricas (□). (Tomado de Willmarth *et al*, (1987).

Sus resultados indican que en la región de pared los valores de las tensiones de Reynolds obtenidos por la medición directa de u' y v' son aproximadamente 60% de los valores correspondientes calculados por la ecuación (6). Los autores concluyeron, como en Willmarth *et al* (1987), que este comportamiento debe a la introducción de fuerzas No-Newtonianas por el efecto de los polímeros. Se sugiere la inclusión de un término para considerar esta fuerza. Por esto la ecuación (6) queda:

$$-\frac{\langle \overline{u'v'} \rangle}{u_*^2} = \left[1 - \frac{y}{h} \right] - \left(\frac{\partial U^+}{\partial Y^+} \right) - G \quad (7)$$

Gyr & Bewersdorff (1995) proponen denominar al término G como déficit de tensiones de Reynolds o tensión elástica, aunque no ofrecen ninguna información sobre el origen de este término. Los autores especulan

que si G puede ser considerada como una tensión elástica, entonces el déficit se debe a las propiedades elásticas de las soluciones poliméricas como resultado de los efectos reológicos. Otra posible explicación es que, como la estructura de los flujos turbulentos es alterada, la influencia de la viscosidad puede ser efectiva en una distancia mayor desde la pared.

Un resultado relativamente sorprendente es la existencia de tensiones de Reynolds negativas en el rango de $2 < Y^+ < 25$ (Durst et al (1985) y Wei & Willmarth, 1992). Esto significa que para determinadas concentraciones la adición de polímeros conduce a un proceso único de transporte en la región de pared. En este proceso los elementos fluidos con velocidad mayor que la velocidad media del flujo, se alejan de la pared e consecuentemente aquellas con velocidad menor son transportadas hacia esta región.

Este resultado ha sido objeto de estudio en varios trabajos sin que hasta hoy exista un consenso sobre la faja de ocurrencia y su magnitud. Durst *et al* (1985) [apud Wei & Willmarth 1992] obtuvieron valores de las tensiones de Reynolds (adimensionadas con la velocidad de fricción) del orden de -0.06 para $Y^+ \approx 2-3$. La explicación para este resultado, según Durst *et al* (1985), está basada en que en esta región $U^+ = Y^+$, por lo tanto la ecuación (6) puede ser resumida a:

$$\frac{-\overline{u'v'}}{u_*^2} = -\frac{r}{R} \quad (8)$$

De la expresión anterior es posible ver que, cerca de la pared, las tensiones de Reynolds necesariamente serán negativas. Los valores obtenidos por Wei & Willmarth (1992) son más negativos $(-0,2)$ y ocurren en la región intermedia $(5 < Y^+ < 25)$. Al estudiar este comportamiento los autores analizan tres posibles causas que pueden provocarlo: fenómenos trascientes iniciales (relativo al proceso de inyección de polímeros), desalineamiento del sensor y distribución no uniforme de los trazadores en el flujo (*seeding*),

5. Otras herramientas estadísticas.

Espectros de potencias.

Este término caracteriza la energía cinética turbulenta. El área bajo la curva del espectro de potencia de una componente de la velocidad es proporcional a la energía cinética media de la misma.

Virk et al (1967) estudiando el espectro de energía turbulenta axial concluyeron que, cerca de la pared, los espectros de las soluciones poliméricas y el de los flujos Newtonianos son esencialmente iguales, aunque para mediciones realizadas en el centro de la tubería ambos flujos presentan diferencias. Estas ocurren, fundamentalmente, en la región inercial donde, para

flujos Newtonianos existe una pendiente aproximada de $-5/3$, para valores del número de ondas, kw entre 2 y 20, lo que no ocurre para las soluciones poliméricas en las cuales se produce un cambio abrupto en la pendiente de $-2/3$ a -4 en $kw=6 \text{ cm}^{-1}$.

Este resultado indica que la adición de polímeros provoca modificaciones en los espectros de potencia, siendo la característica más significativa, la ausencia de región inercial.

Wei & Willmarth (1992), realizaron un amplio estudio de los espectros de potencia utilizando anemometría láser para las mediciones de u' e v' . Estos espectros fueron calculados para diferentes valores del número de Reynolds de fricción, ($Y^+=15, 22, 45$ y 170).

Para la obtención de los espectros fue utilizado un sistema introducido por Perry & Abell (1975) en el cual se representa en la abscisa el logaritmo de la frecuencia

adimensionada, $\omega^+ = \frac{\omega V}{u_*^2}$ y en la ordenada el

parámetro $\psi(\omega^+)$, que es proporcional a la raíz media cuadrática (*RMS*) de la señal (u' , v' o $u'v'$) adimensionado con las variables internas (u_* y v).

La relación entre $\psi(\omega^+)$ y la densidad espectral de potencia adimensionada $\phi^+(\omega^+)$ es dada por:

$$\psi^+(\omega^+) = \omega^+ \phi^+(\omega^+) \quad (9)$$

Para $Y^+=170$ (fuera de la región de pared) los espectros de potencia de las tres señales no son modificados. Para las mediciones realizadas en la región de pared ($Y^+ < 100$), ver figura (7) para $Y^+=15$, los resultados mostraron que:

Espectros para la componente u' .

Cuando Y^+ disminuye, existe una redistribución de energía de las altas para las bajas frecuencias hasta el intervalo $-0,5 < \log(\omega^+) < 0$ para las soluciones poliméricas. En los tres casos ($Y^+=15, 22, 45$), el comportamiento para $\log(\omega^+) < -1$ muestra que el espectro de los fluidos Newtonianos es mucho menor que el de las soluciones poliméricas. Esta tendencia queda más nítida para los puntos más próximos de la pared.

Espectros para la componente v' .

En todos los casos, las amplitudes espectrales son mucho menores para las soluciones poliméricas en toda la faja de frecuencias. Los autores consideran que, de los resultados obtenidos para las componentes u' y v' , se puede concluir que la adición de polímeros provoca una redistribución de energía en la componente axial de las altas para las bajas frecuencias y también provocan un severo amortiguamiento de la componente normal en toda la faja de frecuencia.

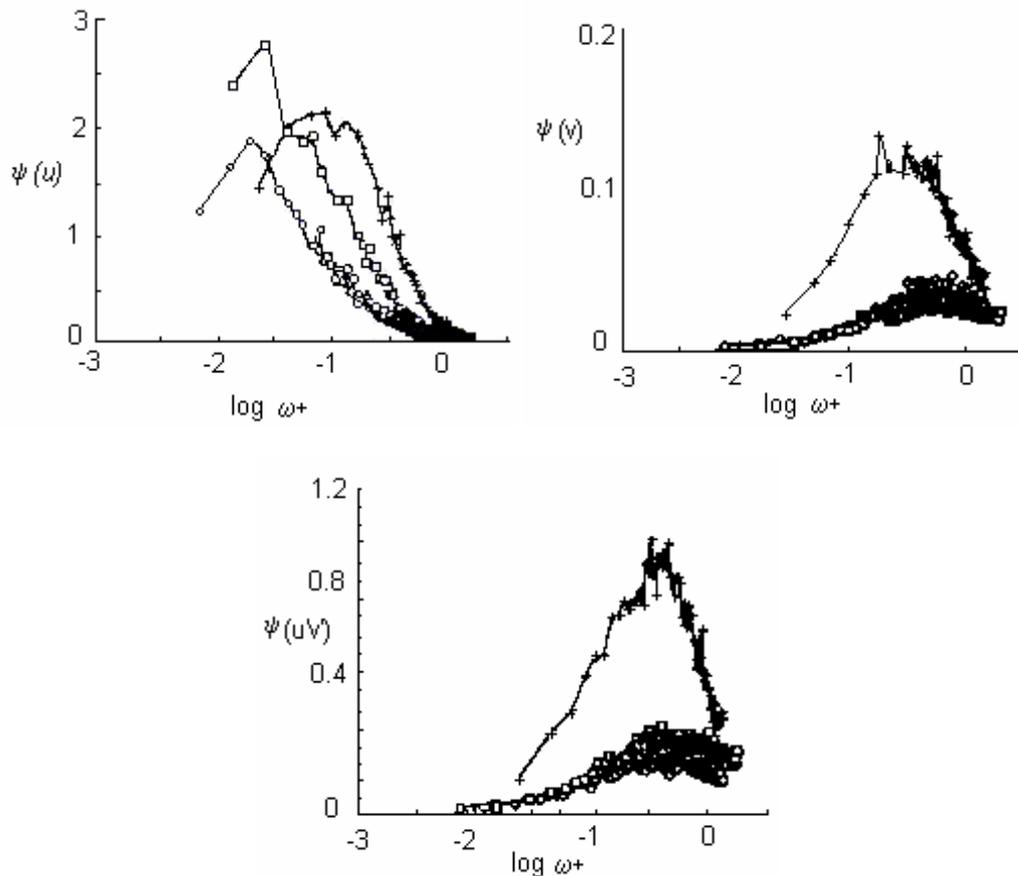


Figura (7) Espectros de energía de u' , v' y $u'v'$. + agua, $C_{sm}=1000$ ppm o $C_{sm}=500$ ppm. Tomado de Wei & Willmarth (1992)

Espectros para las tensiones de Reynolds $\overline{u'v'}$

Los espectros de potencia de las tensiones de Reynolds son significativamente afectados por el comportamiento de la componente fluctuante v' , siendo que en todos los casos existe una gran semejanza entre los espectros de las tensiones de Reynolds y de v' . Los resultados de Wei & Willmarth (1992) son consistentes con los obtenidos por Berman (1990) y Usui (1991) [apud Wei & Willmarth (1992)] que justifican la diferencia entre los espectros de la componente u' y de las tensiones de Reynolds debido al hecho que el proceso de colapso en las soluciones poliméricas depende de la concentración de las mismas. Para concentraciones menores (500 ppm) el polímero inyectado es rápidamente disperso en el flujo, mientras que, para concentraciones entre 500 y 5 000 ppm, el polímero inyectado se desmembra en una gran cantidad de hilos de polímero.

Los resultados arriba analizados muestran que para las soluciones poliméricas el contenido energético de los

vórtices de diferentes tamaños es transferido para los mayores turbiliones (fenómenos de cascada invertida de Kolmogorov). Esto es interpretado como el amortiguamiento de los vórtices menos energéticos y por lo tanto una disminución en el proceso disipativo.

6. Funciones de densidad de probabilidad conjunta (F.D.P.C.) y sus momentos superiores.

Esta función no ha sido muy utilizada para analizar el efecto de los polímeros sobre los flujos turbulentos Newtonianos. No obstante Gyr & Bewersdorff (1995) opinan que para discutir los aspectos relacionados con el transporte de cantidad de movimiento, así como sus estructuras es apropiada la utilización de esta función. La FDPC muestra la probabilidad de encontrar una componente de la velocidad (u' por ejemplo) en un área del plano $u'-v'$ en un tiempo dado. Esta probabilidad es mostrada por las líneas de contorno de la función. Para flujo turbulento el segundo y cuarto cuadrante son

dominantes en la distribución de los valores de u' y v' que son, como ya se discutió, los que más contribuyen a las tensiones de Reynolds.

Estos autores citan el trabajo de Grampert & Yong (1990) para caracterizar el comportamiento de las soluciones poliméricas. A partir del análisis de la figura 8 se pueden ver las diferencias básicas entre las FDPC de las soluciones poliméricas y de los solventes, como se comenta abajo:

- El área limitada por la línea de contorno para las soluciones poliméricas es menor y muestra fluctuaciones predominantes en la dirección principal del flujo,
- La turbulencia es más anisotrópica siendo los valores de u' predominantes y los de v' son significativamente menores para el sistema soluto-solvente,

- Para los flujos de soluciones poliméricas, el eje principal de la elipse tiene un comportamiento que tiende a ser más paralelo con la dirección del flujo. Debido a esto las fluctuaciones transportan menos cantidad de movimiento para la región de pared.

De los trabajos analizados dentro de la Hipótesis de la SCI, podemos concluir que la adición de polímeros provoca:

- Incremento de la intensidad turbulenta, u'/u .
- Amortiguamiento de las tensiones de Reynolds, con valores negativos en la región $2 < Y^+ < 25$. Se ha especulado la existencia de un término no-Newtoniano en la ecuación de balance de la cantidad de movimiento.
-

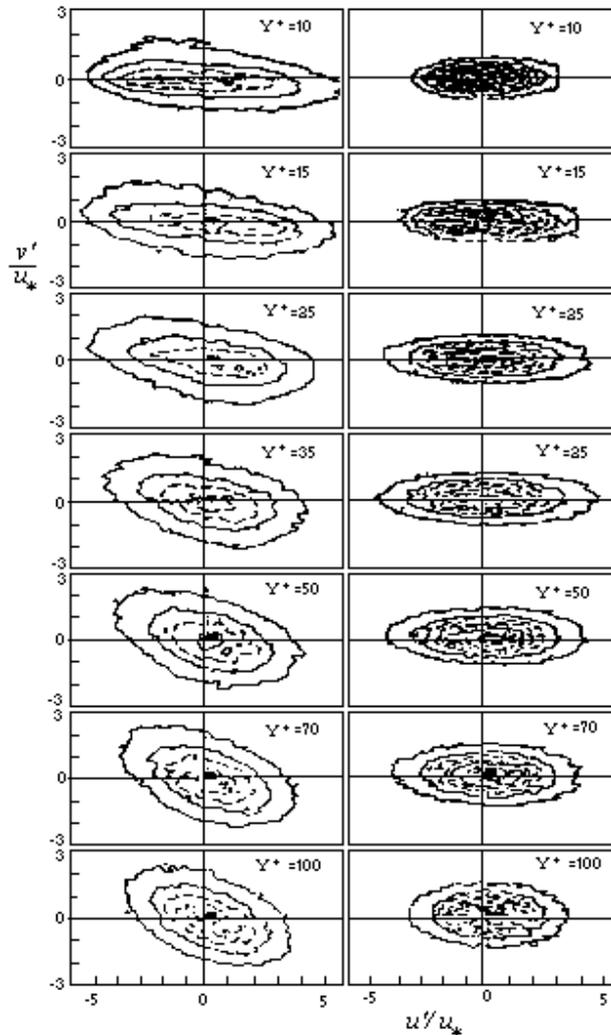


Figura 8. Función de densidad de probabilidad conjunta para agua (a la izquierda) y para soluciones poliméricas. (a la derecha). Tomado de Gyr & Bewersdorff (1995)

- Una redistribución de energía de las altas frecuencias para las bajas frecuencias en la región $Y^+ < 100$. Cerca de la pared ($Y^+ < 20$) esta redistribución es más evidente, mostrando consistencia con el perfil de intensidad turbulenta de la componente v' .
 - Disminución de la producción de energía cinética turbulenta.
 - Mayores escalas de tiempo de los vórtices menos energéticos.
- Incremento en la anisotropía de las componentes fluctuante de la velocidad, u' e v' .

7. Conclusiones.

El presente trabajo es la primera parte de un amplio estudio bibliográfico sobre el efecto que provoca la adición de determinadas sustancias, polímeros en este caso, a un flujo Newtoniano. En esta parte se consideran las modificaciones que ocurren en la estructura de la turbulencia abordando ésta desde el punto de vista de la dinámica de los fluidos. Las conclusiones más importantes son:

1. Como consecuencia de las variaciones de las componentes fluctuantes de la velocidad, u' y v' se inhibe el proceso de formación de las estrías, provocando una disminución de las erupciones.
2. Ocurre un amortiguamiento de las tensiones de Reynolds. Algunos autores han obtenido valores negativos de este parámetro en puntos muy próximos del contorno sólido, no existiendo consenso sobre la interpretación física de este comportamiento.
3. Se verifica una disminución de la producción de energía cinética turbulenta.
4. Los espectros de potencia para las soluciones poliméricas no presentan región inercial, lo que significa que los procesos de producción y disipación de energía cinética turbulenta están más próximos por lo que se inhibe el desarrollo de la cascada de energía. Este comportamiento se debe a la pérdida de correlación (anisotropía) entre las componentes u' y v' .
5. Existen modificaciones en las escalas de turbulencia.
6. Hay un proceso de estabilización de la región de pared.

8. Bibliografía.

1. Achia, B.U.; Thompson, D.W. Structure of the turbulent boundary in drag-reducing pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 81, pt. 3, p. 439-464, 1972.
2. Adrian, R.J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanic. *Annual Review Fluid Mechanics*, v. 23, p. 261-304, 1991.
3. Donohue, G.L.; Tiederman, W.G.; Reischman, M.M. Flow visualization of the near-wall region in a drag-reducing channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 56, pt. 3, p. 559-575, 1972.
4. Durst, F., Keck, T. & Kleine, R. Turbulence quantities and Reynolds stress in pipe flow of polymeric solutions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LASER ANEMOMETER, 1., Proceeding., p.31, 1985.
5. Eckelman, L.D.; Fortuna, W.C.; Hanratty, T.J. Drag reduction and the wavelength of flow-oriented wall eddies. *Nature*, v. 236, p. 94, 1972.
6. Fortuna, G.; Hanratty, T.J. The influence of drag reducing polymer on turbulence in the viscous sublayer. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 53, p. 575, 1972.
7. Gyr. A.; Bewersdorff, H.W. Drag reduction of turbulent flows by additives. Kluwer Academic Publishers, 1995. P. 234.
8. Hinch, E.J. Mechanical model of dilute polymer solutions in strong flows. *Physics of Fluids*. v. 20, n. 10, Pt. II, p. S22, oct., 1977.
9. Kim, H.T.; Kline, S.J.; REYNOLDS, W.C. The Production of Turbulence Near a Smooth Wall in Turbulent Boundary Layers. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 50, p. 133-160, 1971.
10. Kline, S.J.; Reynolds, W.C.; Schraub, F.A.; Runstadler, P.W. The Structure of Turbulent Boundary Layers. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 30, p. 741-773, 1967.
11. Lee, S. H-K, Sengupta, S., Wei, T. Effect of polymer additives on Görtler vortices in Taylor-Couette flow. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 282, p. 115-129, 1995
12. Lodes, A.; Macho, V. The influence of polyvinylacetate additive in water on turbulent velocity field and drag reduction. *Experiments in Fluids*, v. 7, p. 383-387, 1989.
13. Logan, S.E. A laser velocimeter measurement of Reynolds stress In dilute polymer solutions. California, Institute of Technology, 1972. (Ph. D. Thesis).
14. Luchik, T.S.; Tiederman, W.G. Turbulent structure in low-concentration drag-reducing channel flows. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 190. p. 241-263, 1988.
15. Lumley, J.L. Drag reduction in two phase and polymer flows. *Physics Fluids*, v. 20, n. 10, pt. II, p. S64-S71, oct., 1977.
16. Massah, H.; Kontomaris, K.; Schowalter, W.R.; Hanratty, T.J. The configurations of a FENE dead-spring chain in transient rheological flows and in a

- turbulent flow. *Physics Fluids*, v. 5, pt A. p. 881, 1993.
17. McComb, W.D.; Rabie, L.H. Local drag reduction due to injection of polymer solutions into turbulent flow in a pipe. Part I: Dependence on local polymer concentration. *Aiche Journal*, v. 28, n. 4, p. 547-557, jul., 1982.
 18. Oldaker, D.K.; Tiederman, W.G. Spatial structure of the viscous sublayer in drag-reducing channel flows. *Physics Fluids*, v. 20, n 10, pt. II, p. S133-S144. oct., 1977.
 19. Perry, A.E; Abell, C.J. Scaling laws for pipe-flow turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 67, pt. 2, p. 257-272, jan., 1975.
 20. Pinho, F.T.; Whitelaw, J.H. Flow of non-newtonian fluids in a pipe. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 34, p. 129-144, 1990.
 21. Rabin, Y.; Zielinska, B.J.A. Scale-dependent enhancement and damping of vorticity disturbances by polymers in elongational flow. *Physics Rev. Letter.*, v. 63, p. 512, 1989.
 22. Rudd, M.J. Laser dopplermeter and polymer drag reduction. *Chem. Eng. Progr. Symp. N. 111*, v. 67, p. 21, 1971.
 23. Sá Pereira, A.; Pinho, F.T. Turbulent pipe flow characteristics of low molecular weight polymer solutions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 55, p. 321-344, 1994.
 24. Tiederman, W.G.; Smith, A, J.; Oldaker, D.K. Structure of the viscous sublayer in drag-reducing channel flows. IN: ZAKIN & PETERSON, G.K. *Turbulence in Liquids*, Princeton, Science Press, 1977.
 25. Tiederman, W.G.; Luchik, T.S.; Bogard, D.G. Wall-layer structure and drag reduction. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 156, p. 419-437, 1985.
 26. Toms, B.A Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tube at large Reynolds numbers. In: *International Congress on Rheology*, 1, North Holland, 1948, Proceeding. North Holland, e.ed., 1948. V. 2., p 135-141.
 27. Zakin, J.L.; Hunston, D.L. Effect of polymer molecular variables on drag reduction. *J. Macromol. Sci. Phys.*, B18, n. 4, p. 795, 1980.
 28. Usui, H.; Maeguchi, K.; Sano, Y. Drag reduction caused by the injection of polymer thread into a turbulent pipe flow. *Physics Fluids*, v. 31, p. 2518-2523, sept., 1988.
 29. Vilalta, G.; Ortiz, J.P. Dinâmica dos fluidos e mecanismos da redução de atrito em escoamentos turbulentos. (em CD-Rom) In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECÁNICA, 3., La Habana, 1997. Memórias. La Habana. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 1997.
 30. Virk, P.S.; Merrill, E.W.; Mickley, H.S.; Smith, K.A.; Mollo-Christensen, E.L. The Toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 30, pt. 2, p. 305-328, 1967.
 31. Wei, T.; Willmarth, W.W. Modifying turbulent structure with drag-reducing polymer additives in turbulent channel flows. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 245, p. 619-641, 1992.
 32. Willmarth, W.W.; Wei, T.; Lee, C.O. Laser anemometer measurements of Reynolds stress in a turbulent channel flow with drag reducing polymer additives. *Physics Fluids*, v. 30, no. 4, p. 933-935, 1987.

Method for turbulence's active control. An historical look. Part I.

Abstract

This paper is a bibliographical study of the well-known Toms phenomenon. The addition of polymers to the solvent flows (usually Newtonian) produces an interesting behaviour, which sometimes is not well interpreted. Because of the complexity of the topic, the diversity of polymeric systems and experimental limitations, several theories try to explain why a diminishment of the hydraulic losses in these fluids occurs. Some theories approach the discussion from the point of view of fluid dynamics establishing that the polymers provoke significant alterations in the structure of the turbulent flows with important modifications in the energy transfer processes between the wall region and the turbulent core of the flow.

Key words: Turbulence, polymers, hydraulic losses, structure of the turbulence.