UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TRANSFERENCIA DE CALOR EN FLUJOS VISCOELASTICOS OSCILATORIOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE DOCTOR EN INGENIERIA

PRESENTA
JOSE RAMON HERRERA VELARDE

DIRECTOR DE TESIS: DR. BALTASAR MENA INIESTA
ASESOR: DR. ROBERTO ZENIT CAMACHO

MEXICO, D.F. **2001**

TRANSFERENCIA DE CALOR EN FLUJOS VISCOELASTICOS OSCILATORIOS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Baltasar Mena su valioso apoyo para realizar el presente trabajo. Un sincero reconocimiento a su labor como asesor del proyecto de investigación y como director de tesis. Su motivación como investigador y amigo estará siempre presente.

Agradezco al Dr. Roberto Zenit su invaluable participación como asesor de tesis. Su entusiasmo y comentarios fueron decisivos en la culminación del trabajo. Agradezco el apoyo y amistad brindada durante todo este tiempo.

Agradezco a los Doctores Francisco Ávila, Roberto Best, Jaime Cervantes, Federico Méndez, Jorge Rojas, Florencia Serranía y Francisco Solorio, sus valiosos comentarios y sugerencias al revisar esta tesis.

I N D I C E

Capítulo III.- DISEÑO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Capítulo IV.- DISCUSION DE RESULTADOS

Capitulo V.-CONCLUSIONES

NOMENCLATURA

Símbología

Letras Latinas:

A	Amplitud de oscilación
A_1, A_2, A_3	Constantes en el modelo de Ostwald de Waele (ec 2 39)
a	Radio interior de la boquilla.
c_p	Calor específico a presión constante.
G(t-t')	Módulo de relajación (ec 2 3)
g_{ij}	Tensor métrico
I_γ , II_γ , III_γ	Invariantes del tensor de deformación
i	$(-1)^{1/2}$
J_o	Función de Bessel del primer tipo y de orden cero
J'_o	Derivada de la función de Bessel con respecto a la posición
$J_{o,a}$	Función de Bessel evaluada en la posición $r=a$
K	Argumento de la función de Bessel Ec 2 10
k	Conductividad térmica
m	Consistencia del fluido ec 1 19
N(λ)	Espectro de relajación
No	$\eta_o\,(1+i\omega\lambda_1)\,/\,(1+i\omega\lambda_2)$
n	Parámetro de potencia ec 1 19
P	Presion
P_o	Presión isotropica arbitraria
Q	Flujo masico
R	Posicion radial adimensional ($R = r/a$)
Re	Número de Reynolds
Reo	Numero de Reynolds oscilante ($Reo = 2\rho\omega A a/\eta$)
r	Coordenada radial (coordenadas cilindricas)
T	Periodo de oscilacion
[illegible]	Solucion general del perfil de temperatura

T	Temperatura
T_g	Solución general para el perfil de temperatura.
T_p	Solución particular para el perfil de temperatura
T_o	Temperatura de pared
	Temperatura de extrusión
	Temperatura del flujo a la entrada de la boquilla
T_b	Temperatura global (ecuación 4 1)
T_{ij}	Tensor total de esfuerzos
t	Tiempo
$\langle t \rangle$	Tiempo promedio
U_o	Coeficiente de la función de Bessel, ecuación 2 15
V	Velocidad vectorial
V_r	Componente de la velocidad en la dirección radial
V_z	Componente de la velocidad en la dirección axial
V_θ	Componente de la velocidad en la dirección angular
V_i	Componente de la velocidad en la dirección i
V_m	Velocidad maxima ecuación 2 15
V'_z	Velocidad resultante de la superposición de flujo (oscilante y Poiseuille ecuacion 2 6)
$\langle V \rangle$	Velocidad promedio
V^*	Velocidad adimensional ($V^* = V_z/V_m$)
V_{1z}	Componente temporal de la velocidad axial (ecuacion 2 9)
V_{2z}	Componente en la posicion radial de la velocidad axial (ecuacion 2 9)
Y_o	Funcion de Bessel del primer tipo y de orden cero
z	Coordenada axial

Letras Griegas

ω	Rapidez de oscilacion
$\langle \omega \rangle$	Valor promedio de la rapidez de oscilacion
[illegible]	[illegible] de Maxwell
[illegible]	[illegible] de Maxwell

γ	Tensor de deformacion
$\gamma^1, \gamma^2, \gamma^3$	Invariantes del tensor de deformación
γ	Tensor de rapidez de deformación.
δ	Función delta de Dirac
η	Viscosidad dependiente de la rapidez de deformación
η_o	Viscosidad a rapidez de deformación nula
θ	Temperatura adimensional ($\theta = (T_p - T_o) / T_o$)
θ_b	Temperatura global adimensional.
λ_1	Tiempo de relajación en el modelo de Oldroyd
λ_2	Tiempo de retardamiento en el modelo de Oldroyd
ρ	Densidad
τ	Tensor extra de esfuerzos
ω	Frecuencia de oscilacion

Abreviaturas

PEBD	Polietileno de baja densidad
SO	Sin oscilación
OT	Oscilación Transversal
OL	Oscilación Longitudinal
OH	Oscilación Helicoidal
FH	Fibras de Henequen
	Concentración másica en %
PEBD100%	100% de PEBD
PEBD92.5%-FH7.5%	92.5% de PEBD y 7.5% de FH
PEBD85%-FH15%	85% de PEBD y 15% de FH

RESUMEN

En el presente estudio se realizó la investigación teórico-experimental de la transferencia de calor generada por disipación viscosa en un flujo viscoelástico oscilatorio. Se inicia el estudio con la investigacion experimental de la influencia de las oscilaciones de tipo longitudinal, transversal y helicoidal, sobre la dinámica del flujo utilizando fibras de henequén como trazadores del flujo. Los resultados obtenidos indican que las oscilaciones de tipo longitudinal y transversal de la boquilla inducen una orientacíon preferencial en las fibras. Las fibras en diferentes concentraciones no modificaron las propiedades mecanicas del material extrudido bajo los diferentes tipos de oscilación, debido a que estas no tuvieron el tratamiento adecuado para la compatibilidad matriz-fibra. En lo referente a la transferencia de calor, se realizó el estudio teorico-experimental para el caso de oscilaciones de tipo longitudinal. En la parte teórica se consideran los modelos viscoelástico lineal y newtoniano generalizado con las ecuaciones constitutivas de Oldroyd y Ostwald de Waele respectivamente. Las soluciones analíticas obtenidas permitieron analizar separadamente el efecto de la elasticidad y la viscosidad en la disipacion viscosa del flujo oscilante, concluyendo que las caracteristicas elasticas y viscosas del fluido, así como la rapidez de oscilacion del flujo juegan un papel importante en dicha disipacion. La validacion de los resultados teoricos con los experimentales indica que el modelo de Oldroyd predice el incremento de la temperatura adimensional global θ por efecto de las oscilaciones a bajas rapideces de oscilacion, mientras que el modelo de Ostwald presenta cualitativamente la misma tendencia de la temperatura global en todo el rango experimentado.

ABSTRACT

In the present study we studied theoretically and experimentally the heat transfer due to viscous dissipation in an oscillatory pipe flow In the first part of the study we investigated the influence of the pipe oscillations in the longitudinal, transversal and helicoidally directions and the effects on the flow dynamics. We utilize henequen fibers for the flow visualization. The results obtained show that the longitudinal and transversal oscillations type shows an induced preferential orientation of the fibers. Additionally, the measurements of the mechanical properties of the extruded materials were measured to quantify the effects of the oscillations on the final product The flow field in an oscillatory pipe is studied theoretically for two non-Newtonian fluid models for the case in which the pipe oscillates in the main direction of the flow The velocity and temperature fields are obtained for the case in which the mean velocity caused by the pressure gradient is of the same order as the oscillation velocity The models considered are a linear viscoelastic fluid and power law model fluid The momentum and conservation energy are solved and analytic expressions for the velocity and temperature fields are found The nature of the velocity and temperatures profiles is explored for a range of parameters In general, it can be concluded that the temperatures rise with in the fluid increases with the speed of oscillations For a given speed of oscillation the viscoelastic fluid was found to experience a higher temperature rise than a shear thinning fluid of equivalent characteristics Direct comparisons of the theoretical models results show good agreements with the experimental results In general, it is found that the viscous dissipation, enhanced by the oscillatory motion, results in an increase of the bulk flow temperature

Introducción.

Los fluidos encontrados en la industria invariablemente están clasificados como fluidos viscosos y/o elásticos. Definimos como fluido no-newtoniano aquel cuya dinámica en estado líquido no puede ser descrita por las ecuaciones de Navier-Stokes. Si los fluidos son afectados por los esfuerzos a que fueron sometidos en tiempos pasados, los llamamos no-newtonianos de tipo viscoelástico (fluidos con memoria), si no dependen de su historia de deformación, son de tipo viscoso

Es un hecho bien conocido que la mayoría de los flujos de fluidos viscoelásticos, en particular los líquidos poliméricos en estado permanente y transitorio, no pueden ser adecuadamente descritos por ecuaciones constitutivas sencillas, sino que es necesario utilizar ecuaciones más complejas que permitan calcular los esfuerzos en el líquido en función de la historia del flujo [7] El comportamiento de soluciones poliméricas y polímeros fundidos es muy complejo y frecuentemente se utilizan métodos que combinan la mecánica del medio continuo con ideas relacionadas con la microestructura del fluido en cuestion. Este campo de estudio se conoce como Reologia [46]

Algunos flujos sencillos de fluidos no-newtonianos admiten solución analítica debido a la geometría del problema o por la serie de suposiciones que se hacen. Sin embargo, para niveles bajos de elasticidad las ecuaciones constitutivas simples del tipo Maxwell y Oldroyd-B predicen adecuadamente algunos de los resultados [illegible] geometrías sencillas [illegible]

A pesar de que la mayoría de los estudios de flujos de fluidos viscoelásticos suponen el caso isotérmico, muchos flujos de interés práctico son no-isotérmicos. En polímeros por ejemplo, la combinación de altas viscosidades y rapideces de deformacion dan como resultado la transformación de grandes cantidades de energía mecánica en calor y por lo tanto una elevación de la temperatura del material Este fenómeno es usado en extrusores donde la disipación viscosa acelera la fundición del material En este proceso el material se deforma a temperaturas cercanas a la llamada temperatura de transición, donde las propiedades mecánicas son más sensibles a cambios térmicos [22]. Estrictamente hablando el tensor de esfuerzo apropiado para describir el comportamiento de los materiales viscoelásticos no solamente depende de la deformación y de la historia de la deformación sino también de la temperatura y la historia de la temperatura [19].

La validacion de algunos modelos ha sido posible usando técnicas experimentales para la determinacion de campos de velocidades mediante técnicas de anemometría láser [47] y estudios de birrefringencia para determinar el campo de esfuerzos en soluciones polimericas y polímeros fundidos [13,49]

Estado del Arte.

i) Descripción de la Problemática.

De acuerdo con la investigación bibliográfica realizada podemos decir que en términos generales existen a la fecha pocos estudios de tipo teórico-experimental en flujos de fluidos viscoelásticos, en contraste con los existentes para fluidos Newtonianos, y en particular los que se refieren a transferencia de calor [19]. De estos estudios, la mayoría son de tipo teórico, existiendo la necesidad de realizar estudios de tipo experimental [1]. Para ubicar en un contexto general el tema de estudio del presente trabajo, hacemos referencia a las investigaciones más relevantes en transferencia de calor en flujos en tuberías de sección transversal circular para fluidos no-newtonianos, así como de aquellos que consideran flujos oscilatorios.

ii) Antecedentes

El problema de la transferencia de calor en flujos laminares newtonianos en conductos es de gran importancia en muchos procesos industriales por lo que ha sido estudiado extensivamente. Graetz [21] inició el estudio de esta clase de problemas resolviendo el caso en el que se desprecia la conducción axial y se considera la transferencia de calor por convección forzada en un fluido newtoniano. Recientemente Yin y Bau [51] resolvieron analíticamente el problema de Graetz considerando conducción axial en el fluido y en el tubo para los casos de temperatura y flujo de calor constante en la pared. Ellos encontraron que la conducción axial juega un papel importante en la región de entrada, modificando el número de Nusselt y la cantidad de calor [illegible]

[illegible]

de elemento finito, las ecuaciones de flujo laminar en desarrollo y transferencia de calor en un conducto semicircular, considerando dos condiciones de frontera: temperatura de pared constante y flujo de calor constante en las direcciones axial y lateral. El estudio se realizó para un fluido no-newtoniano tipo ley de potencia, considerando disipación viscosa y una viscosidad dependiente de la temperatura. Los resultados obtenidos indican la importancia del comportamiento no-newtoniano del fluido sobre la transferencia de calor y las características del flujo. La dependencia de la viscosidad con la temperatura mostró efectos significativos sobre el número de Nusselt local y sobre el gradiente de presión, encontrando que se incrementaba el Nusselt para el caso de temperatura de pared constante. El calentamiento generado por disipación viscosa tiene un efecto muy pronunciado sobre la transferencia de calor que puede incluso cambiar la dirección del flujo de calor en el caso de temperatura de pared constante.

Recientemente, Taegeen et al. [45] realizaron un estudio numérico del flujo en desarrollo de un fluido no-newtoniano tipo Binghman sujeto a una temperatura de pared constante, considerando el efecto de disipación viscosa y el modelo de viscosidad propuesto por Papanastasiou et al [42]. De acuerdo con los resultados obtenidos, la longitud de desarrollo se reduce a medida que aumenta el esfuerzo del límite de fluencia en el fluido tipo Bingham, obteniendo las mismas características en cuanto a transferencia de calor, discutidos en el problema clásico de Graetz.

En fluidos no-newtonianos de tipo viscoelástico, particularmente polímeros fundidos, el acoplamiento entre la ecuación de momento y la ecuación de energía puede [illegible] propiedades [illegible] que dependen de la [illegible]

[36] . El estudio del flujo de polímeros fundidos ha dejado de utilizar ecuaciones constitutivas relativamente simples, tales como las ecuaciones de segundo orden tipo Maxwell ó la ecuación tipo Oldroyd-B, para considerar ecuaciones más sofisticadas conocidas como ecuaciones constitutivas de modo multi-diferencial o multi-integral, las cuales consideran el carácter no lineal de estos materiales. A la fecha, se ha utilizado con bastante éxito la ecuación integral llamada K-BKZ propuesta por Papanastasiou et al. [43] para la simulación del flujo de polímeros fundidos bajo condiciones isotérmicas principalmente y solamente en algunos casos se ha utilizado esta ecuación para flujos no isotérmicos [20,16].

El estudio teórico de la disipación viscosa en flujos cortantes oscilantes de tipo newtoniano y viscoelástico lineal ha sido recientemente estudiado por Ding et al [14] Los resultados obtenidos muestran la importancia de la disipación viscosa y los errores que se pueden cometer en la medición de las propiedades reológicas de materiales con los equipos convencionales cuando ésta no es considerada

El flujo de polímeros fundidos a través de tuberías oscilantes ha sido estudiado en detalle por Mena y colaboradores [37,38,39] Las investigaciones se han hecho considerando la superposicion de oscilaciones longitudinales (paralelas al flujo) en el material viscoelástico extrudido, mediante una boquilla oscilante colocada a la salida del extrusor y el efecto de dichas oscilaciones en el flujo y en las propiedades mecanicas del producto extruido para el caso de flujos isotermicos bajo condiciones de temperatura de pared constante

Las conclusiones más importantes obtenidas de las investigaciones realizadas por dichos investigadores pueden resumirse en.

<u>Conclusiones experimentales</u> (polímeros fundidos)

1) La superposición de oscilaciones en la sección de una boquilla a la salida del extrusor, altera las propiedades mecánicas del material extrudido

2) La presión a la entrada de la boquilla se reduce por efecto de las oscilaciones. Esta reducción se manifiesta en una reducción de la energia total consumida por unidad de masa del producto extrudido.

3) Las oscilaciones inducen una orientación en las cadenas poliméricas del material extrudido Esta orientación es la responsable de alterar las propiedades mecánicas del producto final.

<u>Conclusiones Teóricas</u> (soluciones poliméricas)

1) El modelo viscoelástico lineal predice pequeñas diferencias en el patron de flujo con respecto al modelo viscoso

2) El modelo inelástico tipo ley de potencia predice incrementos en el flujo másico en la región de reducción de gradiente de presión acorde con los datos experimentales

3) A pesar de que las propiedades elásticas del fluido juegan un papel de importancia secundaria en el flujo a traves del tubo oscilante, no es posible despreciarlas completamente en una descripcion teorica del problema

Investigaciones similares se han realizado por [illegible] et al. [illegible] para determinar el efecto de la superposición de oscilaciones sobre el flujo y las propiedades mecánicas [illegible] dirección angular Los resultados obtenidos por Fridman, son similares a los reportados por Mena en cuanto al aumento de flujo másico por efecto de las oscilaciones y mejora en el esfuerzo a la ruptura de las probetas extrudidas con oscilaciones. También concluye que existe una longitud óptima de la boquilla oscilante para alterar las propiedades mecánicas del material oscilado

Estudios de la transferencia de calor en flujos oscilantes se han realizado en el Centro de Ingeniería de Polímeros de la Universidad de Akron (OH., U S.A.). Estas investigaciones se han hecho con polímeros fundidos sometidos a oscilaciones longitudinales y angulares mediante un dado colocado a la salida del extrusor, el cual consiste de dos cilindros concéntricos El fluido se hace pasar a través de la sección anular y es oscilado por el movimiento periódico del cilindro interior. Los resultados del efecto de las oscilaciones y la temperatura promedio del material a la salida del dado, han sido reportados por Isayev et al. [29] para el caso de oscilaciones ortogonales al flujo y por Wong et al [50] para el caso de oscilaciones paralelas al flujo En ambos casos, la modelación de las oscilaciones se hizo utilizando la ecuación viscoelástica constitutiva de Leonov [34] Las conclusiones en ambos trabajos son las siguientes

1 La boquilla oscilante, genera un decremento del gradiente de presiones y un aumento de la temperatura a la salida del extrusor

2 A altas frecuencias de oscilacion y bajos flujos masicos la elevación de temperatura en la seccion oscilante es más importante que los efectos viscoelásticos

3 La energía disipada por efectos viscosos en la superposicion de oscilaciones en la dirección paralela y ortogonal al flujo para desplazamientos de gran amplitud, es mas importante que la generada por el flujo debido al gradiente de presion

4 La conducción de calor es más importante a flujos másicos bajos, principalmente para altas frecuencias

4. La conducción de calor es más importante a flujos másicos bajos, particularmente para altas frecuencias

5. El flujo en una boquilla oscilante puede ser tratado como un proceso adiabático a altos flujos másicos

6. Generalmente, los cálculos basados en conducción de calor describen mejor los resultados observados para las características de la boquilla que los cálculos basados en una elevación de temperatura adiabárica.

De las conclusiones obtenidas por Isayev y Wong existe solamente el punto común con Fridman y Mena en cuanto al decremento de la presión a la salida de la boquilla por efecto de las oscilaciones siendo las conclusiones restantes para el caso de flujo no-isotérmico

iii) Importancia y Justificación de la Investigación

La investigación teórico-experimental realizada para el estudio de la transferencia de calor en flujos viscoelásticos oscilatorios con aplicaciones en el proceso de extrusión de polímeros, no es solo interesante desde el punto de vista fundamental sino que, además, tiene una relevancia importante en la aplicación industrial. El ahorro de energía, la obtención de materiales con propiedades mecánicas mejoradas y el control de calidad del producto extrudido, son resultados de gran interés para industrias que manejan y producen este tipo de materiales

Para destacar la importancia del control de temperatura del material extrudido se han reportado algunos fenómenos observados durante la extrusión de materiales poliméricos [illegible] estos tienen relación con el [illegible] de presión a la salida del [illegible] el proceso, los cuales ocasionan algunas inestabilidades que resultan interesantes. Adewale y Leonov [1] observaron que para un valor crítico del esfuerzo de corte algunos polímeros exhiben, en flujos cortantes, inestabilidades de flujo dando por resultado distorsiones regulares e irregulares en el interior y la superficie del material extrudido. Por otra parte, Kolnaar y Keller [32] describen el efecto observado durante la extrusión de polietileno. Ellos reportan un rango de temperatura muy definido en el cual se da el mínimo de resistencia al flujo del material y fuera del cual se presentan inestabilidades semejantes a las reportadas por Adewale y Leonov (distorsiones regulares e irregulares en el interior y la superficie del material extrudido). Se discute además que éste es un problema abierto, puesto que estos efectos no se han podido explicar mediante consideraciones de tipo reológico, por lo que se infiere la importancia del control de temperatura en el material extrudido cuando la disipación viscosa es relevante

CAPITULO I.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

I.1- DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

En la presente investigacion se realiza el estudio teórico-experimental de la transferencia de calor generada por efecto de disipacion viscosa en un fluido no-newtoniano que fluye a traves de un conducto de seccion transversal circular el cual se mantiene a temperatura de pared constante. El fluido se mueve por efecto de un gradiente de presion en la direccion axial del conducto donde además es sometido a esfuerzos cortantes por la oscilacion periodica de la pared en la direccion paralela al flujo. En el estudio teorico, se resuelven analiticamente las ecuaciones de conservacion de masa, momento y energia, teniendo como variables los campos de velocidad, presion y temperatura. Para determinar la solucion particular del problema se utilizan las condiciones iniciales y de frontera y una ecuacion constitutiva para el tensor de esfuerzos. Con el objeto de investigar el efecto de la elasticidad y la viscosidad del fluido en la disipacion de energia en el flujo oscilante, se utilizaron dos modelos: el modelo viscoelastico lineal y el no-newtoniano generalizado. Finalmente los resultados son comparados con datos experimentalmente.

1.2- DESCRIPCION MATEMATICA.

El conocimiento del campo de velocidades, presiones y temperaturas en la sección oscilante para determinar la transferencia de calor en el flujo planteado en el presente trabajo de tesis, requiere resolver simultáneamente las ecuaciones de continuidad, movimiento y energía

Ecuación de Continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \overline{V}\right) = 0 \tag{1.1}$$

Ecuacion de Movimiento

$$\rho\left(\frac{\partial \overline{V}}{\partial t} + \left(\overline{V} \cdot \nabla\right)\overline{V}\right) = -\nabla P + \nabla \cdot \tilde{\tau} \tag{1.2}$$

Ecuacion de Energia

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \overline{V} \cdot \nabla T\right) = -\nabla \cdot (k \nabla T) - \tilde{\tau} : \nabla \overline{V} \tag{1.3}$$

donde $\overline{V}$ es el vector velocidad, P es la presion escalar, $\tilde{\tau}$ es el tensor extra de esfuerzos, ρ es la densidad, C_p es el calor específico, k es la conductividad termica y T es la temperatura

El fluido se mueve por efecto de un gradiente de presion constante $\Delta P/\Delta z$ en la direccion z, dentro de un cilindro de sección transversal circular constante de radio a, el cual suponemos que ingresa completamente desarrollado, en estado permanente y a una temperatura promedio T_1, a una region (boquilla oscilante) donde es sometido a oscilaciones longitudinales por el movimiento oscilatorio de la pared que se encuentra tambien a una temperatura T_0, como se representa en la figura 1.1

El movimiento oscilatorio es de la forma [illegible] donde [illegible] representa el producto de la [illegible] y la frecuencia [illegible] presente estudio se analiza el estado [illegible] número de Reynolds para el flujo en estudio es pequeño (Re $\approx 10^{-5}$), razón por la cual se supone en todos los casos flujo de tipo laminar y desarrollado

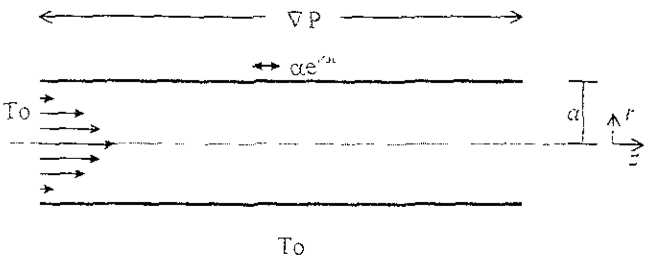


Figura 1.1 Representación esquemática del flujo que ingresa a la boquilla oscilante, con un perfil de velocidades desarrollado a una temperatura promedio T_o y es sometido a la condición de temperatura constante T_o en la pared oscilante.

Para el caso en cuestión, las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, para el flujo de fluidos incompresibles (polímeros fundidos) con propiedades físicas constantes, se reducen a

Ecuación de Continuidad

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{1.4}$$

Ecuación de Movimiento

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla P - \nabla \cdot \tau \tag{1.5}$$

Ecuación de Energía

$$\rho C_p (V \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \tau : \nabla V \tag{1.6}$$

Dada la geometría del problema, resulta conveniente expresar las ecuaciones anteriores en un sistema de coordenadas cilíndricas (r, θ, z), donde la dirección z es a lo largo del eje del tubo. Bajo estas condiciones consideramos únicamente la componente de la velocidad [illegible] identicamente la ecuación de continuidad La ecuación de movimiento en la dirección z para un fluido incompresible y homogéneo se reduce a

$$\rho \frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\,\tau_{rz}) \tag{1.7}$$

donde $\partial P/\partial z$ es el gradiente de presión constante en la dirección axial y τ_{rz} es la componente del tensor extra de esfuerzos en la direccion axial La solucion de la ecuacion (1.7) debe satisfacer las condiciones de frontera

$$\begin{aligned} &\text{i)}\quad V_z = \alpha \exp(i\omega t) \quad \text{en} \quad r = a \\ &\text{ii)}\quad \partial V_z/\partial r = 0 \quad \text{en} \quad r = 0 \quad \text{para toda } t \end{aligned} \tag{1.8}$$

La ecuacion de energia en estado permanente bajo las mismas condiciones, despreciando la transferencia de calor por conduccion en la direccion axial y considerando el efecto de disipación viscosa, queda expresada en la forma

$$\rho C_p V_z \frac{\partial T}{\partial z} = k \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \tau_{rz}\left(\frac{\partial V_z}{\partial r}\right) \tag{1.9}$$

Para la ecuacion de energia consideramos un fluido con un perfil de temperatura constante T [illegible] en la entrada de la seccion oscilante y una temperatura promedio constante T [illegible] en la pared oscilante, con lo cual establecemos las siguientes condiciones de frontera

$$\begin{aligned} &T = \text{[illegible]} \quad \text{en} \quad r = a \quad \text{para toda } z \\ &\partial T/\partial r = 0 \quad \text{en} \quad r = 0 \quad \text{para toda } z \end{aligned} \tag{1.10}$$

[illegible] de las dos clasicas ecuaciones de Navier Stokes [illegible] [illegible] todas las ecuaciones [illegible]

A continuación presentamos los modelos reológicos considerados para obtener la ecuación constitutiva de la componente del tensor extra de esfuerzos τ_{rz}, la cual se utiliza en la ecuación de movimiento (I 7) para determinar el campo de velocidades El campo de velocidades es necesario para resolver la ecuación de energía (I 9) y de esta manera conocer el campo de temperaturas en el flujo del fluido en la boquilla oscilante

I.2.1- MODELO VISCOELÁSTICO LINEAL.

Introducción

El término "viscoelástico" implica la existencia simultánea de propiedades viscosas y elásticas en un material Así, el comportamiento de un material dado depende de la escala de tiempo del experimento en relación a un tiempo de respuesta del material De esta forma, si el experimento es relativamente lento, la muestra tiene un comportamiento mas viscoso que elastico Por otra parte si el experimento es relativamente rápido, el material tiene un comportamiento mas elastico que viscoso En escalas de tiempo comparables observamos materiales de tipo viscoelastico

En el modelo de fluido newtoniano generalizado consideramos la dependencia de la viscosidad con la rapidez de deformación Este modelo ha sido ampliamente utilizado en flujos en estado permanente, sin embargo, para la descripcion de flujos en estado transitorio donde la respuesta elastica del material es importante, este modelo es inapropiado Para incorporar los efectos elasticos es necesario considerar la dependencia temporal del flujo [33,35] Para esto analizaremos fluidos que se encuentran sometidos a deformaciones pequeñas [illegible]

[illegible]

de viscoelasticidad lineal está basado en el "principio de superposición", lo que implica que la deformación a cualquier tiempo es directamente proporcional al valor del esfuerzo aplicado. En la teoría de viscoelasticidad lineal las ecuaciones diferenciales resultantes son lineales con coeficientes constantes.

1.2.3- Modelo Viscoelástico Lineal Generalizado.

El modelo viscoelástico mas sencillo fue propuesto por Maxwell. En este modelo se incluyen los efectos viscosos y elásticos mediante la ecuación

$$\left(1+\alpha_1 \frac{\partial}{\partial t}\right)\tau_{ij} = \beta_1\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)\gamma_{ij} \qquad (1.11)$$

donde $\alpha_1=\lambda_1$ es una constante de tiempo comúnmente llamada tiempo de relajación y $\beta_1=\eta$ es la viscosidad del fluido. Si una rapidez de deformación $\dot{\gamma}_{ij} = \partial\gamma_{ij}/\partial t$ es instantaneamente aplicada al tiempo $t = 0$ y mantenida constante en tiempos subsecuentes $t > 0$, podemos obtener la solucion de la ecuación (1.11)

$$\tau_{ij} = \eta\,\dot{\gamma}_{ij}\left[1 - \exp(-t/\lambda_1)\right] \qquad (1.12)$$

Esta solucion nos indica, que cuando el fluido se ha deformado el crecimiento del esfuerzo se retrasa de acuerdo con la constante de tiempo λ_1. Por otra parte, si un fluido es sometido a una rapidez de deformacion que ha tenido un valor constante $\dot{\gamma}$ para $t < 0$ e instantaneamente se anula al tiempo $t = 0$, la solucion para la ecuacion (1.11) resulta

$$\tau_{ij} = \eta\,\dot{\gamma}_{ij}\left[\exp(-t/\lambda_1)\right] \qquad (1.13)$$

En este caso el esfuerzo se relaja exponencialmente [illegible] dependiendo del [illegible] modelo de Maxwell [illegible]

$$\tau_{ij} = -\int_{-\infty}^{t}\left\{\left(\frac{\eta}{\lambda_1}\right)\exp\left[-\frac{(t-t')}{\lambda_1}\right]\right\}\dot{\gamma}_{ij}(t')\,dt' \tag{I.14}$$

donde el término entre corchetes se conoce como el módulo de relajacion G(t - t'), donde t corresponde al tiempo presente y t' se refiere a tiempos anteriores

Del modelo de Maxwell se concluye que el tensor de esfuerzos calculado a un tiempo t depende de la variacion temporal que tuvo la razón de corte en tiempos pasados con un factor de peso (modulo de relajacion) que decae exponencialmente conforme consideramos tiempos anteriores mas lejanos del tiempo presente En otras palabras el tensor de esfuerzos, depende de la historia con que este fue alcanzado manteniendo una memoria que decrece exponencialmente Si el fluido no presenta una dependencia temporal la ecuacion (I 14) se reduce a la ecuacion constitutiva para el caso de un fluido newtoniano

En general podemos seguir incluyendo terminos lineales para la relacion entre los tensores de esfuerzos $\bar{\tau}$ y de rapidez de corte $\bar{\dot{\gamma}}$. Lo interesante en este tipo de ecuaciones, es que todas se reducen a una forma equivalente a la ecuacion (I 14), donde aparece una integral evaluada en un dominio de tiempos pasados y el integrando es un producto entre el modulo de relajacion G(t-t') y el tensor de rapidez de corte $\bar{\dot{\gamma}}$, o sea

$$- \int G(t-t')\bar{\dot{\gamma}}(t')dt' \tag{I 15}$$

Resulta importante notar, que en el modelo de relajacion G(t-t') aparecen todas las propiedades caracteristicas del fluido mientras que en el tensor de rapidez de deformacion [illegible] [illegible] ecuacion (I 15) [illegible]

1.2.2 -MODELO NEWTONIANO GENERALIZADO.

Introducción

En una importante clase de flujos la rapidez de deformacion tiene una influencia dominante sobre la viscosidad del fluido [5,7] Este tipo de comportamiento es caracteristico de polímeros fundidos, soluciones polimericas y suspensiones En el modelo Newtoniano Generalizado se considera la ley de viscosidad de Newton modificada, como funcion de la rapidez de deformación En algunos fluidos, la viscosidad puede cambiar por varios ordenes de magnitud, la viscosidad del fluido en este modelo es una cantidad escalar y por lo tanto debe depender solamente de las combinaciones de las componentes del tensor de rapidez de deformación $\tilde{\dot\gamma}$ o del tensor de esfuerzo $\tilde{\tilde{\tau}}$ que sean escalares En un tensor $\tilde{\dot\gamma}$, tres escalares independientes pueden obtenerse, considerando la traza de los tensores $\tilde{\dot\gamma}^1$, $\tilde{\dot\gamma}^2$ y $\tilde{\dot\gamma}^3$ los cuales son conocidos como las invariantes del tensor $\tilde{\dot\gamma}$, debido a que sus valores son independientes del sistema de coordenadas elegido para representar las componentes del tensor $\tilde{\dot\gamma}$

$$
\begin{aligned}
I_{\dot\gamma} &= \mathrm{tr}\,\dot\gamma = \sum_i \dot\gamma_{ii} \\
II_{\dot\gamma} &= \mathrm{tr}\,\dot\gamma^2 = \sum_i \sum_j \dot\gamma_{ij}\dot\gamma_{ji} \\
III_{\dot\gamma} &= \mathrm{tr}\,\dot\gamma^3 = \sum_i \sum_j \sum_k \dot\gamma_{ij}\dot\gamma_{jk}\dot\gamma_{ki}
\end{aligned} \qquad (1.10)
$$

Otras cantidades escalares pueden formarse pero son combinaciones de las invariantes dadas en la ecuación (1.10). Para fluidos incompresibles y flujos cortantes las invariantes I y III son nulas por lo que η depende solamente de la invariante II. De esta manera expresamos la viscosidad η en función de la invariante II

CAPITULO II.

TRANSFERENCIA DE CALOR EN FLUJOS VISCOELASTICOS OSCILATORIOS

Con el objeto de investigar el efecto que tienen la elasticidad y la viscosidad del fluido sobre la disipación de energía en la boquilla oscilante, se resuelve la ecuación de energía térmica para el flujo no-newtoniano utilizando los modelos de Fluido Viscoelastico Lineal y Newtoniano Generalizado. Para el modelo Viscoelastico Lineal se considera el espectro de relajación propuesto por Oldroyd donde la elasticidad esta caracterizada por los tiempos de relajación λ_1 y de retardamiento λ_2 del fluido. Es importante notar que el modelo Viscoelastico Lineal esta limitado para deformaciones pequeñas [3]. En el Modelo Newtoniano Generalizado se utiliza la ecuación conocida como Ley de Potencia. En este modelo la viscosidad queda expresada en función de la rapidez de deformación a traves de los parametros m y n. Notese, ademas, que la Ley de Potencias no describe el comportamiento de la viscosidad para valores pequeños de la rapidez de deformación [illegible] donde [illegible]. Para [illegible] [illegible]

2.1- Modelo Viscoelástico Lineal.

2.1.1. - Dinámica del Flujo Viscoelástico Lineal.

En este caso, se caracteriza el fluido viscoelástico por ecuaciones para el tensor total de esfuerzos T_{ij} en función de una presión isotrópica arbitraria P_o, del tensor métrico g_{ij} y del tensor extra de esfuerzos τ_{ij}, en la siguiente forma

$$T_{ij} = -P_o\, g_{ij} - \tau_{ij} \tag{2.1}$$

$$\tau_{ij} = -\int_{-\infty}^{t} G(t-t')\,\dot{\gamma}_{ij}(t')\,dt' \tag{2.2}$$

donde
$$G(t-t') = \int_{-\infty}^{t} [\,N(\lambda)/\lambda\,]\exp[-(t-t')/\lambda\,]\,d\lambda \tag{2.3}$$

de acuerdo con la notación establecida, $\dot{\gamma}_{ij}(t')$ es el tensor de rapidez de deformación, $G(t-t')$ es el llamado modulo de relajación y $N(\lambda)$ el espectro de relajacion

Consideremos el caso particular del modelo propuesto por Oldroyd. El espectro de relajacion esta dado por la ecuacion

$$N(\lambda) = \eta_o\,\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\,\delta(\lambda) + \eta_o\,\frac{\lambda_1-\lambda_2}{\lambda_1}\,\delta(\lambda-\lambda_1) \tag{2.4}$$

donde η_o es la viscosidad a rapidez de deformacion nula, λ_1 y λ_2 son los tiempos de relajacion y retardamiento respectivamente y δ representa la funcion delta de Dirac

Para nuestro caso particular se demuestra facilmente que la relacion entre la componente del tensor extra de esfuerzos [illegible] y la componente de la velocidad en la direccion del flujo [illegible] se [illegible]

[illegible]

Para resolver la ecuación de movimiento (1 7)

$$\rho \frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\,\tau_{rz}) \qquad (1\ 7)$$

en la region de la boquilla oscilante proponemos a $V'_z(r,t)$ como variable dependiente definida por la superposicion del flujo obtenido para un perfil de velocidades tipo Poiseuille con un flujo oscilatorio $V_z = V_z(r,t)$ en la forma

$$V'_z(r,t) = V_z(r,t) - (P_o / 4\eta_o)\ (a^2 - r^2) \qquad (2\ 6)$$

donde P_o es el gradiente de presion en la dirección axial Sustituyendo $V'_z(r,t)$ en la ecuacion (1 7), obtenemos

$$\frac{\partial V'_z}{\partial t} = \frac{\eta_o}{\rho}\left(\frac{\partial^2 V'_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial V'_z}{\partial r}\right) \qquad (2\ 7)$$

bajo las condiciones de frontera

$$V'_z(a,t) = \alpha \exp(i\omega t) \quad y \quad \partial/\partial t\ V'_z(0,t) = 0 \qquad (2\ 8)$$

Proponemos una solucion de la forma

$$V''_z(r,t) = V_1(t)\,V_{2z}(r) = \alpha \exp(i\omega t)\,V_{2z}(r) \qquad (2\ 9)$$

sustituyendo esta solucion propuesta en la ecuacion (2 7) obtenemos

[illegible] (2 10)

donde

[illegible]

La ecuación (2 10) es una ecuación diferencial tipo Bessel de orden cero con argumento complejo Las soluciones de la ecuación de Bessel son las llamadas funciones de Bessel Jo y Yo, tal que la solución general esta dada como

$$V_{2z} = A\ Jo\ [Kr] - B\ \ Yo\ [Kr] \tag{2 11}$$

donde Jo y Yo son funciones periódicas amortiguadas

La solución para Yo no está acotada en Kr = 0 (Yo [0] tiende a menos infinito) por lo tanto B =0 y la solucion para la ecuacion (2 11) nos queda

$$V_{2z} = A\ Jo\ [Kr] \tag{2 12}$$

aplicando las condiciones de frontera establecidas en la ecuación (2 8) obtenemos

$$V_{2z}\,(r,t) = \alpha\ \frac{Jo\ [Kr]}{Jo[Ka]}\ \exp\,(i\omega t) \tag{2 13}$$

donde Jo es una funcion de Bessel del primer tipo

El perfil de velocidades para el flujo de un fluido viscoelastico de tipo lineal dentro de la seccion oscilante resulta

$$V = \alpha\ \frac{J_o[Kr]}{J_o[Ka]}\exp(i\omega t) + \frac{P_o}{4\eta_o}(a^2 - r^2) \tag{2 14}$$

Expresamos la ecuacion (2 14) en la forma

$$V = A\ Jo\ [Kr]\ [illegible] \tag{2 15}$$

Para el caso particular del espectro de relajación considerado en la ecuación (2 4), la constante K se reduce a

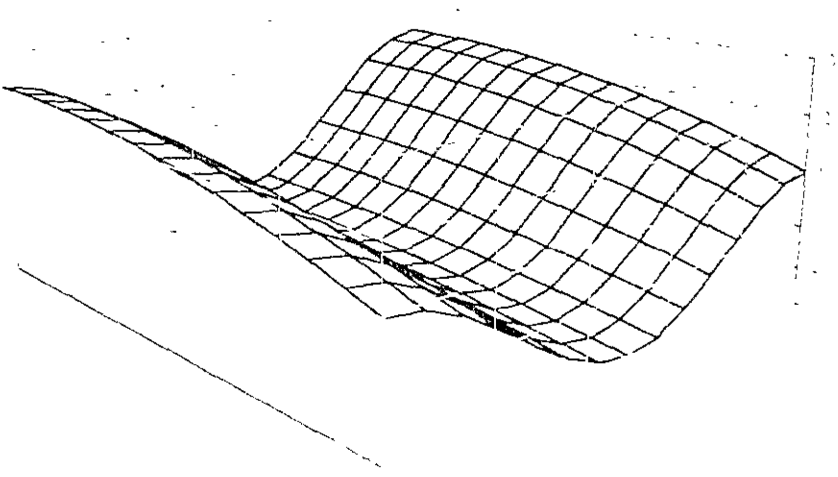
$$K = \left(\frac{\omega\rho}{\eta_o} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{-i(1 + i\omega\lambda_1)}{1 + i\omega\lambda_2} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (2\ 16)$$

Con el objeto de observar el efecto de la oscilación, se impone la condicion de que el número de Reynolds del flujo a través de la boquilla sin oscilaciones sea del mismo orden de magnitud que el número de Reynolds que se tiene en el flujo por efecto del arrastre de la pared oscilante Entonces,

$$\frac{2\rho\langle V_z\rangle a}{\eta_o} \approx \frac{2\rho\omega A a}{\eta_o} \qquad (2.17)$$

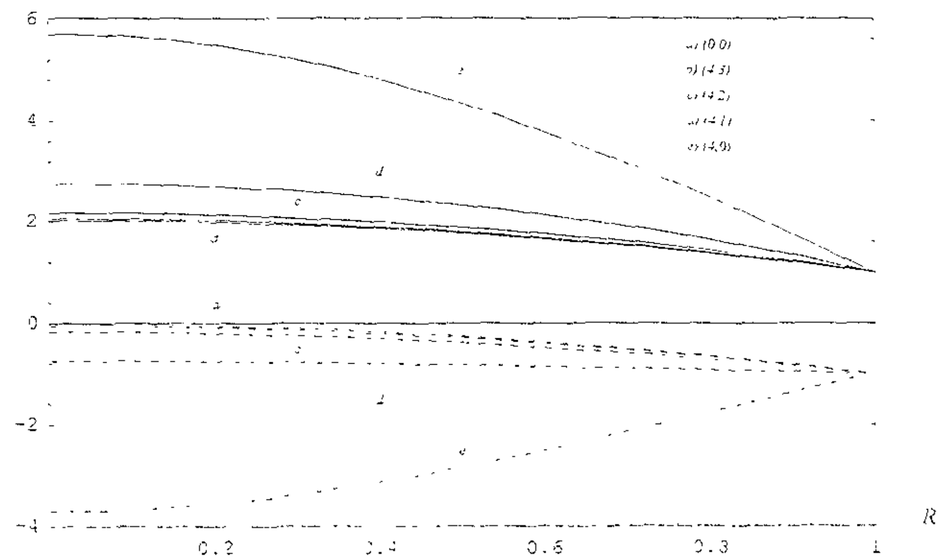
condicion de la cual se obtiene que la rapidez de oscilacion $\alpha = \omega A$ debe ser del mismo orden de magnitud que la velocidad promedio $\langle V_z \rangle$ que tenemos en el flujo tipo Poiseuille

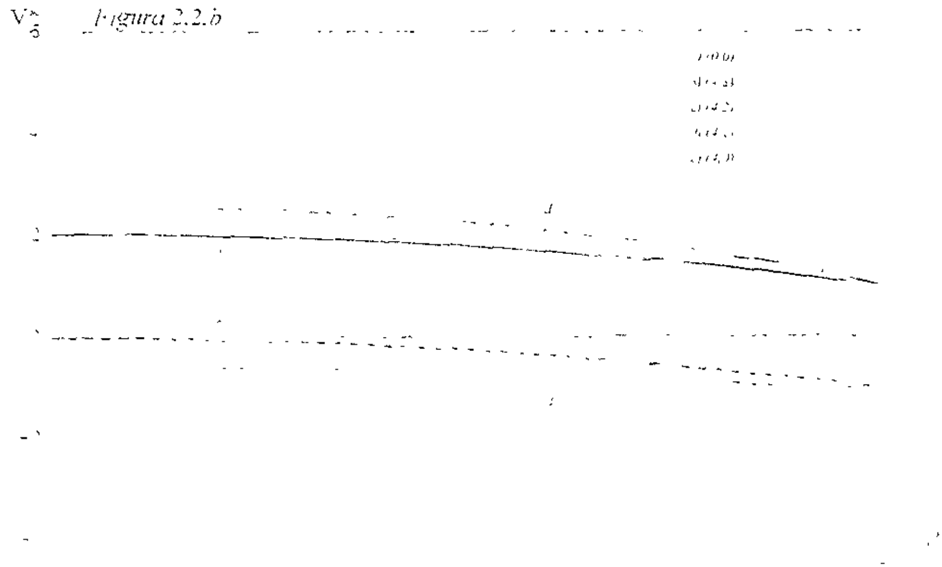
En el caso particular $\alpha = V_m$ y $\omega\rho / \eta_o = 1$ utilizamos la ecuacion 2 15 para mostrar en la figura 2 1, el perfil de velocidades $V^* = V_z / V_m$, en función de la posicion radial $R = r/a$, durante un periodo de oscilación T, de un fluido viscoelastico caracterizado por el parámetro de elasticidad $-i(1+3i)/(1+i)$, el cual por simplicidad se expresa en la forma (3.1)



En la figura 2 2 se muestra el perfil de velocidades $V^*=V_z/V_m$, para cuatro combinaciones de los parámetros elásticos $\omega\lambda_1$ y $\omega\lambda_2$, y para dos valores de rapidez de oscilación longitudinal ωA a) 0 001 m/s, b) 0 005 m/s, incluyendo el fluido newtoniano ($\lambda_1=\lambda_2=0$) y considerando las curvas para el tiempo correspondiente al periodo de oscilación T=0, donde se obtiene la mínima deformación del fluido, lo cual ocurre cuando la boquilla se mueve en el sentido del flujo principal (línea continua, correspondiente a la cresta en la figura 2 1) y para el tiempo correspondiente al período de oscilación ½ T donde se presenta la máxima deformación del fluido, caso en que la boquilla se mueve en sentido contrario al flujo (línea a trazos correspondiente al valle en la figura 2 1)

En dicha figura se observa que para una rapidez de oscilación constante, conforme se aumenta el tiempo de relajación λ_1 con respecto al tiempo de retardamiento λ_2 en el parámetro elastico ($\omega\lambda_1$, $\omega\lambda_2$), se obtiene una mayor variacion de la velocidad V^* del flujo, principalmente en el centro de la boquilla Este comportamiento es más pronunciado para el fluido tipo Maxwell (4,0) La variacion antes mencionada disminuye con el incremento de la rapidez de oscilacion longitudinal, sin embargo, para el fluido tipo Maxwell ocurre un mayor defasamiento en el perfil de velocidades al incrementar la rapidez de la velocidad de oscilacion, efecto discutido por Herrera y Mena [27]


V^*
Figura 2.2.a
6
4
2
0
-2
-4
0.2
0.4
0.6
0.8
1
R
a) (0,0)
b) (4,3)
c) (4,2)
d) (4,1)
e) (4,0)


V^*_5
Figura 2.2.b

[illegible]

2.1.2.- Transferencia de Calor.

Con el perfil de velocidades obtenido dentro de la sección oscilante, resolvemos la transferencia de calor en flujo laminar con convección forzada dado por la ecuación (1.9)

$$\rho C_p V_z\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = k\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \tau_{rz}\left(\frac{\partial V_z}{\partial r}\right) \tag{1.9}$$

Suponemos que dentro de la boquilla oscilante existe un perfil de temperaturas desarrollado con un gradiente de temperatura constante en la dirección z. Sustituimos la componente del tensor extra de esfuerzos τ_{rz} definida por la ecuación (2.5) en la ecuación (1.9)

$$\rho C p V_z\left(\frac{\Delta T}{\Delta Z}\right) = k\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dT}{dr}\right) - \eta_O\left(\frac{1 - i\omega\lambda_1}{1 - i\omega\lambda_2}\right)\left(\frac{dV_z}{dr}\right)\left(\frac{dV_z}{dr}\right) \tag{2.18}$$

De acuerdo con la ecuacion (2.15), sustituimos el perfil de velocidades y su derivada con respecto a la posición radial en la ecuacion (2.18)

$$\rho C_p\left(V_m\left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right) - C_0 J_0\right)\left(\frac{\Delta T}{\Delta Z}\right) = k\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dT}{dr}\right) - \eta_o\left(\frac{1 - i\omega\lambda_1}{1 - i\omega\lambda_2}\right)\left(C_0 J_0' - \left(\frac{2V_m r}{a^2}\right)\right)^2 \tag{2.19}$$

donde $J_0' = \frac{\partial}{\partial r} J_0(Kr)$

Con las suposiciones consideradas, obtenemos una ecuacion diferencial ordinaria para la temperatura T, la cual puede integrarse directamente con respecto a r y de esta manera determinar la solucion general del perfil de temperaturas T.

[illegible] (2.20)

[illegible]

La solución particular de la ecuación (2.20), se obtiene considerando las condiciones de frontera dadas en la ecuación (1.10)

$$
\begin{array}{ll}
\text{i)}\ T = T_o \quad \text{en } r = a \ \text{para toda } z & \\
\text{ii)}\ (\partial T / \partial r) = 0 \quad \text{en } r = 0 \ \text{para toda } z & (1.10)
\end{array}
$$

De la condición de frontera ii) se concluye que A=0. Aplicando la condición de frontera i) se obtiene la constante B, con lo cual la solución particular T_p queda expresada en la forma

$$
\begin{aligned}
T_p = {} & T_o + (\rho C_p / k) \Big[V_m (r^2/4 - r^4/(16a^2) - (3/16)\, a^2) + U_o \Big[\int \{(1/r) \int J_o r dr\} dr \\
& - \int \{(1/r) \int J_{oa} r dr\} dr \Big|_{r=a} \Big] \Big] (\Delta T/\Delta z) + (No/k) \Big[U_o^2 \Big[\int \{ (1/r) \int J_{oa}'^2 r dr \} dr \Big|_{r=a} - \\
& \int \{(1/r) \int J_o'^2 r dr\} dr \Big] + (4 U_o V_m / a^2) \Big[\int \{(1/r) \int J_o' r^2 dr\} dr - \int \{(1/r) \int J_{oa}' r^2 r\} dr \Big|_{r=a} \Big] \\
& - V_m^2 \{ r^4/(4a^4) - 1/4 \} \Big] \qquad (2.21)
\end{aligned}
$$

donde J_{oa} es la función de Bessel evaluada en $r = a$.

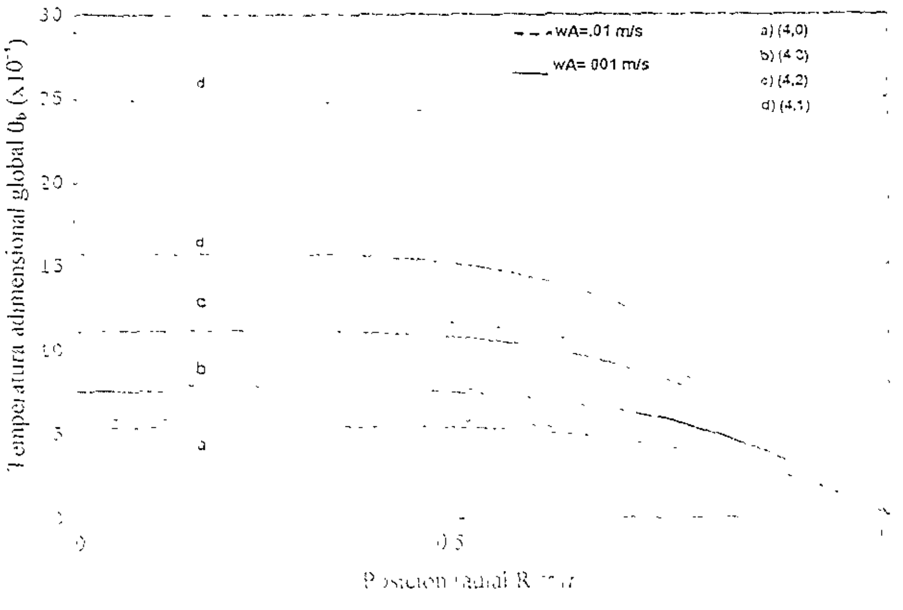
Para el cálculo de T_p se supone un gradiente de temperatura axial unitario $\Delta T/\Delta z = 1\ ^{o}C/m$ (en la sección 4.2 se analiza y discute el valor de dicho gradiente) y se define la rapidez oscilante promedio $\langle\alpha\rangle$, evaluada en un tiempo correspondiente a un periodo de oscilación, como

$$
\langle \alpha \rangle = \frac{\int_0^{1} \alpha\, e^{i\omega t}\, dt}{\int_0^{1} dt} \qquad (2.22)
$$

Finalmente se utilizan los valores de diseño de la boquilla, con rapideces de oscilación dentro del rango de operación en el laboratorio ([illegible]-50 x10[illegible] m/s) y considerando las propiedades características del PEO [illegible] (Tabla [illegible])

En la figura 2.3 se muestra el comportamiento de la temperatura adimensional θ, definida como $\theta = (T_p-T_o)/T_o$, la cual representa la variación de temperatura del flujo por disipación viscosa debido a las oscilaciones de la boquilla, en función de la posición radial $R = r/a$, para cuatro combinaciones de los parámetros elásticos ($\omega\lambda_1$, $\omega\lambda_2$) y dos valores de la rapidez de oscilación longitudinal α

De acuerdo con el modelo viscoelástico lineal, la variación de temperatura adimensional θ del flujo por disipacion viscosa en la boquilla oscilante, se incrementa conforme aumenta el tiempo de relajación λ_1 con respecto al tiempo de retardamiento λ_2, efecto que se hace más notorio al aumentar la rapidez de oscilación de la boquilla, como se puede observar en la figura 2.3, donde el perfil de temperatura de mínima disipación viscosa corresponde al caso dado por el modelo de Maxwell



[illegible]

2.2.-Modelo Newtoniano Generalizado.

2.2.1.- Dinámica del Flujo.

En este caso caracterizamos al fluido tipo newtoniano generalizado por la componente τ_{rz} del tensor extra de esfuerzos definido en la ecuación (1.20)

$$\tau_{rz} = m\dot{\gamma}^{n}_{rz} \tag{2.24}$$

donde $\dot{\gamma}_{rz}$ es la componente del tensor de rapidez de deformación, m es una medida de la consistencia del fluido y n especifica el grado de comportamiento no-newtoniano del fluido. Nótese que $n=1$ representa el caso de un fluido newtoniano y m corresponde a la viscosidad η_0 a rapidez de deformación nula.

Para resolver la ecuación de movimiento

$$\rho\frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\,\tau_{rz}) \tag{2.25}$$

suponemos que para deformaciones pequeñas del flujo oscilante (Reo < Re), la componente axial de la velocidad V_z es la superposición del flujo oscilante $V_{1z}=V_{1z}(t)$ con un flujo tipo Poiseuille $V_{2z}=V_{2z}(r)$, donde $V_{1z} = \Re e\{\omega A e^{i\omega t}\}$, ω y A son respectivamente la frecuencia y amplitud de la oscilación. Sustituyendo V_z en la ecuación (2.25) obtenemos

$$i\omega^2 \rho A e^{i\omega t} = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\,\tau_{rz}) \tag{2.26}$$

si además suponemos un gradiente de presión constante $\Delta P/\Delta z$ en la dirección axial, podemos integrar la ecuación (2.26) con respecto a r para obtener la solución general de la componente del tensor de esfuerzos τ

$$\tau_{rz} = -\frac{r}{2}\left(\frac{\Delta P}{\Delta z} + i\rho\omega^2 A e^{i\omega t}\right) + \frac{C_1}{r} \qquad (2\ 27)$$

La componente del tensor de esfuerzos debe ser finita en $r=0$, por lo tanto $C_1=0$ y la solución particular para τ_{rz} resulta

$$\tau_{rz} = -\frac{r}{2}\left(\frac{\Delta P}{\Delta z} + i\rho\omega^2 A e^{i\omega t}\right) \qquad (2\ 28)$$

Si sustituimos τ_{rz}, dado por la ecuación (1 20) obtenemos

$$m\left(\frac{dV_z}{dr}\right)^n = \frac{r}{2}\left(\frac{\Delta P}{\Delta z} + i\rho\omega^2 A e^{i\omega t}\right) \qquad (2\ 29)$$

la cual puede expresarse

$$\frac{d\,V_z}{d\,r} = \left(\frac{r}{2\,m}\right)^{\frac{1}{n}}\left(\frac{\Delta P}{\Delta z} + i\omega^2\rho A e^{i\omega t}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad (2\ 30)$$

integrando V_z con respecto a r, obtenemos la solucion general

$$V_z = \left(\frac{1}{2m}\right)^{\frac{1}{n}}\left(\frac{\Delta P}{\Delta z} + i\omega^2\rho A e^{i\omega t}\right)^{\frac{1}{n}}\left(\frac{r^{\frac{1}{n}+1}}{\frac{1}{n}+1}\right) + C_2 \qquad (2\ 31)$$

Determinamos C_2 utilizando la condicion de frontera $V_z(r=a) = i\omega A\exp(i\omega t)$ para toda z y obtenemos la solucion particular para el perfil de velocidades en la boquilla oscilante

$$V_z = \left(\frac{a}{2m}\right)^{\frac{1}{n}}\left(\frac{\Delta P}{\Delta z} + i\omega^2\rho A e^{i\omega t}\right)^{\frac{1}{n}}\left(\frac{a}{\frac{1}{n}+1}\right)\left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^{\frac{1}{n}+1}\right] + i\omega A e^{i\omega t} \qquad (2\ 32)$$

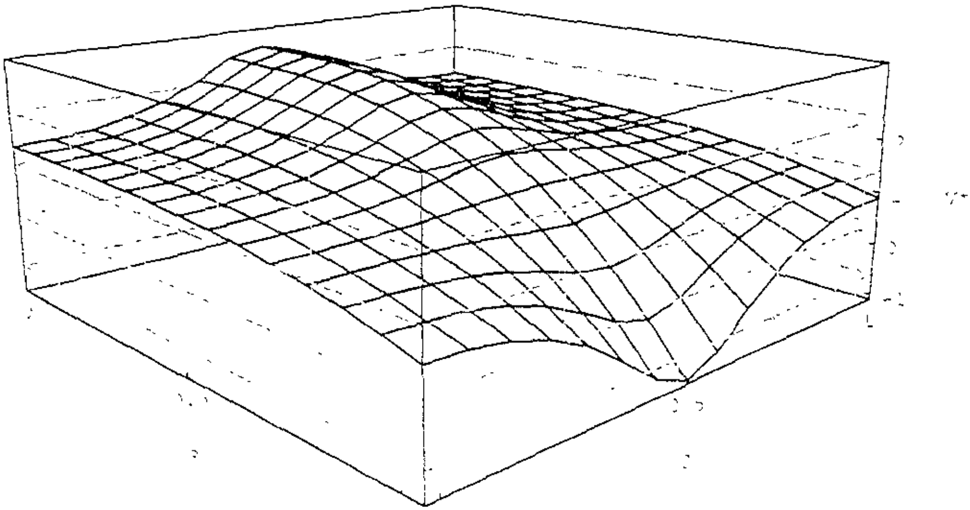
Si expresamos el perfil de velocidades Vz dado por la ecuación 2 32 en función del flujo volumétrico Q obtenemos

$$V_z = \left(\frac{Q - \omega A a^2 e^{i\omega t}}{\pi a^2}\right)\left(\frac{1+3n}{1-n}\right)\left(1-\left(\frac{r}{a}\right)^{\frac{1}{n}+1}\right) + \omega A e^{i\omega t} \tag{2 33}$$

en este caso la velocidad máxima V_m para el flujo tipo Poiseuille resulta

$$V_m = \left(\frac{Q}{\pi a^2}\right)\left(\frac{1-3n}{1+n}\right) \tag{2 34}$$

Utilizamos las ecuaciones 2 33 y 2 34 para mostrar en la figura 2 4 el perfil de velocidades $V^* = V_z/V_m$ de un fluido descrito por una ley tipo potencia, caracterizado por un parametro de potencia n= ½, en función de la posición radial R = r / a durante un período de oscilación T , bajo condiciones de operacion de la boquilla en el laboratorio (Q=15x10-8 m3/s y ωA= 3×10^{-3} m/s)



[illegible] Perfil de velocidad [illegible] posición radial [illegible] de oscilación [illegible] fluido [illegible] de potencia [illegible]

En la figura 2.5 se muestra el perfil de velocidades $V^*=V_z/V_m$ de un fluido viscoelástico para cuatro valores del parámetro de potencia *n*, y considerando las curvas para los tiempos correspondientes al período de oscilación T=0 donde se obtiene la mínima deformación del fluido (línea continua, que corresponde a la cresta en la figura 2.4) y para el período de oscilación ½ T donde se presenta la maxima deformación del fluido (línea discontinua, correspondiente al valle en la figura 2 4) La representación anterior se hace con los valores de rapidez de oscilación longitudinal ωA a) 1×10^{-3} m/s y b) 5×10^{-3} m/s

El perfil de velocidades del flujo oscilante para un fluido descrito por la ley de potencia de (tipo pseudoplastico, *n* (1) , como se muestra en la figura 2 5, presenta un incremento de la velocidad V* conforme decrece el parámetro de potencia *n* cuando la boquilla se mueve en la dirección del flujo principal (linea continua), mientras que cuando ésta se mueve en el sentido contrario al flujo (línea a trazos), se observa el efecto antes mencionado entre dos posiciones radiales (una cercana a la pared oscilante y la otra al centro del conducto) Fuera de dicha posición, se invierte dicho comportamiento, es decir, la velocidad V* decrece cuando se incrementa *n* Por otra parte, se observa que el comportamiento anteriormente descrito se acentúa al aumenta la rapidez de oscilacion longitudinal α

Figura 2.5 a

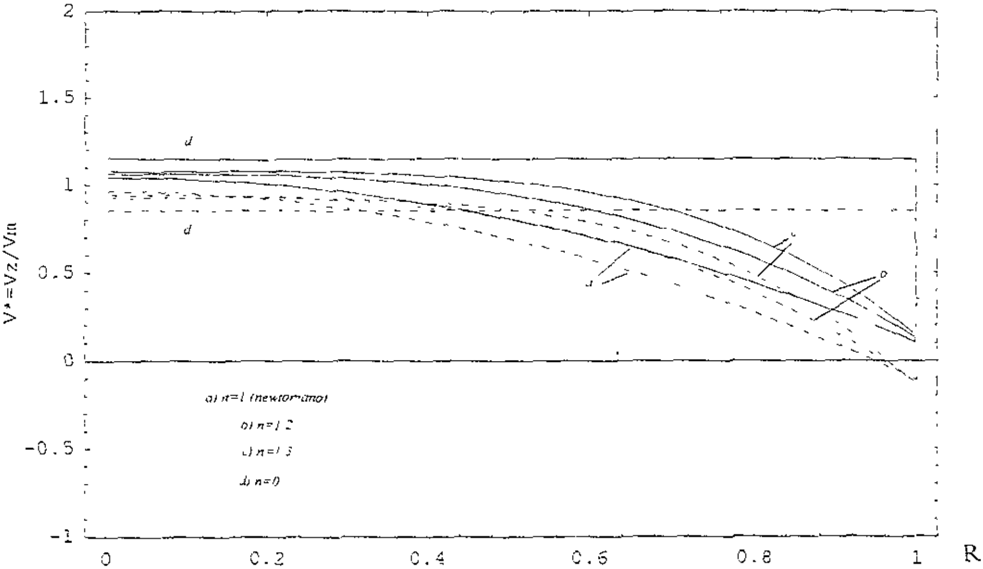


Figura 2.5.b

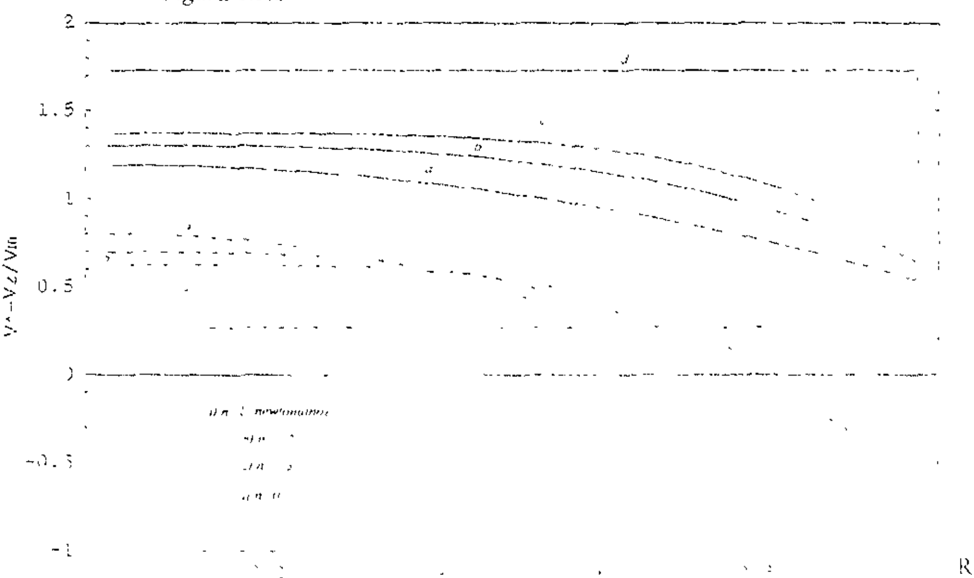


Figura 2.5 - Perfiles de velocidad [illegible] posición radial R [illegible] para [illegible] cuatro valores del parámetro de potencia [illegible] correspondientes [illegible]

2.2.2.- Transferencia de Calor .

Una vez conocido el perfil de velocidades del flujo dentro de la sección oscilante, se resuelve la ecuación de transferencia de calor en flujo laminar con convección forzada

$$\rho C_p V_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \tau_{rz} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \tag{1.9}$$

Para resolver la ecuación (1 9), suponemos dentro de la boquilla oscilante un gradiente de temperatura constante en la dirección z y sustituimos la componente del tensor extra de esfuerzos τ_{rz} definida por la ecuación (1 20)

$$\rho C p V_z \left(\frac{\Delta T}{\Delta Z} \right) = k \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + m \left(\frac{dV_z}{dr} \right)^{n-1} \tag{2 35}$$

Sustituyendo el perfil de velocidades V_z y su derivada con respecto a la posicion radial, de acuerdo con las ecuaciones (2.32) y (2 30) respectivamente, obtenemos

$$\rho C_p \left(A_1 \left(1 - \left(\frac{r}{a} \right)^{\left(\frac{1}{n} + 1 \right)} \right) - A_2 \right) \left(\frac{\Delta T}{\Delta Z} \right) = -k \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + m A_3 r^{1 - \frac{1}{n}} \tag{2 36}$$

donde

$$A_1 = \left(\frac{a}{2m} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\Delta P}{\Delta Z} \text{[illegible]} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{a}{\frac{1}{n} + 1} \right)$$

A_2 [illegible]

$$A_3 = \left(\frac{1}{2m}\right)^{\frac{1}{n}+1}\left(\frac{\Delta P}{\Delta z} + i\omega^2 \rho A e^{i\omega t}\right)^{\frac{1}{n}+1}$$

Considerando un gradiente de temperatura constante en la dirección axial, integramos directamente la temperatura T con respecto a r para obtener la solución general T_g del perfil de temperaturas

$$T_g = \frac{\rho C_p}{k}\left(A_1\left(\left(\frac{r}{2}\right)^2 - \frac{r^{\frac{1}{n}-3}}{\left(\frac{1}{n}-3\right)^2\left(a^{\frac{1}{n}-1}\right)}\right) - A_2\left(\frac{r}{2}\right)^2\right)\left(\frac{\Delta T}{\Delta Z}\right) - A_3\frac{m}{k}\frac{r^{\frac{1}{n}-3}}{\left(\frac{1}{n}-3\right)^2} + C_1 \ln r + C_2 \qquad (2.37)$$

Aplicando las condiciones de frontera

i) $T = T_o$ en $r = a$ para toda z
ii) $(\partial T / \partial r) = 0$ en $r = 0$ para toda z (1.10)

concluimos que $C_1=0$, y

$$C_2 = T_o - \frac{\rho C_p}{k}\left(A_1 a^2\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{\left(\frac{1}{n}-3\right)^2}\right) - A_2\left(\frac{a}{2}\right)^2\right)\left(\frac{\Delta T}{\Delta Z}\right) + A_3\left(\frac{m}{k}\right)\frac{a^{\left(\frac{1}{n}-3\right)}}{\left(\frac{1}{n}-3\right)^2} \qquad (2.38)$$

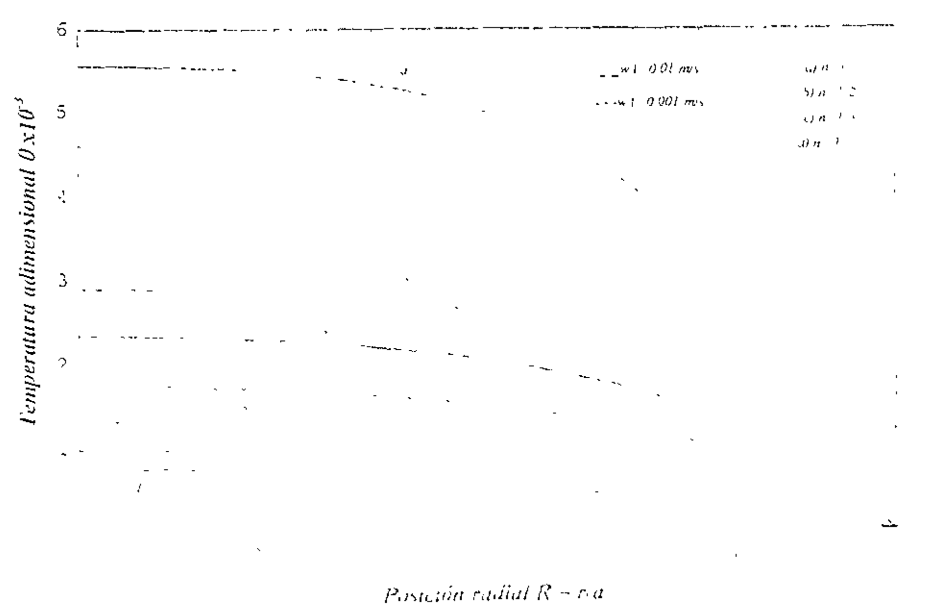
Sustituyendo la constante C_2 en la ecuación (2.37) obtenemos la solucion particular para el perfil de temperaturas T_p

$$T_p = T_o - \frac{\rho C_p a^2}{k}\left(\frac{1}{4}\left(1-\left(\frac{r}{a}\right)^2\right)(A_1 - A_2) - \frac{A_1}{\left(\frac{1}{n}-3\right)^2}\left(1-\left(\frac{r}{a}\right)^{\frac{1}{n}-3}\right)\right)\left(\frac{\Delta T}{\Delta Z}\right) - \frac{A_3 m}{k}\frac{a^{\frac{1}{n}-3}}{\left(\frac{1}{n}-3\right)^2}\left(1-\left(\frac{r}{a}\right)^{\frac{1}{n}-3}\right) \qquad (2.39)$$

En la figura 2 6 se muestra la temperatura adimensional $\theta = (T_p - T_o) / T_o$, dada por la ecuación 2 39 en función de la posición radial R= r/a, para cuatro parámetros de potencia n (1, 1/2, 1/3, y 0) y para dos valores de la rapidez de oscilación longitudinal $\alpha=\omega A$ a) 1×10^{-2} m/s, b) 1×10^{-3} m/s

Los resultados obtenidos con el modelo de ley de potencia indican que la variación de temperatura $\theta = (T_p - T_o) / T_o$ del flujo es menor conforme disminuye el parámetro de potencia n a una rapidez de oscilación constante, efecto que se hace más relevante cuando aumenta la rapidez de oscilación de la boquilla.

Una vez determinado el perfil de velocidades V_z y de temperaturas T_p del flujo en la boquilla oscilante, de acuerdo con los modelos Viscoelástico Lineal y Ley de Potencia, en el capitulo IV se analizan y validan los resultados de dichos modelos con los resultados experimentales Esto se discute en el capitulo III



CAPITULO III.

DISEÑO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el objeto de entender el comportamiento del flujo dentro de la seccion oscilante se analizo el efecto de los diferentes tipos de oscilacion sobre el flujo de material viscoelastico y las propiedades mecanicas del material extrudido, para esto se realizaron experimentos utilizando un extrusor horizontal Haake Rheocord EU-3V de un solo husillo La descripcion del equipo extrusor-boquilla oscilante puede encontrarse en la tesis de Gutierrez [24]

El siguiente objetivo del experimento fue determinar la disipacion de energia viscosa en el flujo en funcion de las caracteristicas de oscilacion longitudinal de la boquilla Para esto se construyo un extrusor similar al anterior De esta manera, fue posible instrumentar la boquilla oscilante para una mejor medicion y control de la temperatura del material extrudido, ademas de resolver algunos problemas presentados en el diseno original Las caracteristicas del equipo construido y el nuevo diseño de la boquilla oscilante se presentan [illegible] tesis de Guadarrama [illegible] 23

A continuación se presenta la descripción general del proceso, el diseño experimental y los resultados obtenidos

3.1.- Efecto de las Oscilaciones en el Flujo Viscoelástico.

En el presente estudio se eligió como fluido de trabajo al Polietileno de Baja Densidad (PEBD), debido a que es un polímero muy comun y relativamente sencillo Además es de gran importancia comercial por su alto nivel de producción, bajo costo, facilidad de procesamiento y excelentes propiedades eléctricas y mecánicas, las cuales están bien caracterizadas [7, 33] En la tabla 3 1 se presentan las propiedades del PEBD reportadas a una temperatura de 160 °C

TABLA 3 1

Propiedades físicas del polietileno de baja densidad (160 °C)

Densidad, ρ	920 0 kg / m^3
Calor específico, C_p	2000 0 KJ / (kg °K)
Conductividad termica, k	0 5 W / (m °K)
Viscosidad a rapidez de deformación nula, η_o	30,701 8 $Pa\ s$
Tiempo de relajacion, λ_1	5 5 s
Tiempo de retardamiento, λ_2	10^{-1} s
Numero de consistencia en Ley de Potencia, m	8202 9 $N\ s^{[illegible]} / m^2$
Indice en Ley de Potencia, n	0 47

Los valores de operacion utilizados en la presente investigacion para los diferentes tipos de oscilacion, estan en el rango de los valores optimos reportados por Mena et al [8] en estudios anteriores En la tabla 3 2, se especifican los valores de frecuencia y amplitud empleados en el experimento para los diferentes tipos de oscilacion [illegible]

TABLA 3 2

Valores para la frecuencia y amplitud utilizados en cada uno de los tipos de oscilación

TIPO DE OSCILACION	AMPLITUD LONGITUDINAL (mm)	FRECUENCIA LONGITUDINAL (Hz)	AMPLITUD ANGULAR (rad)	FRECUENCIA ANGULAR (Hz)
SIN OSCILACION	0	0	0	0
OSC LONGITUDINAL	6	20	0	0
OSC TRANSVERSAL	0	0	0 26	20
OSC HELICOIDAL	6	20	0 26	20

De acuerdo con los resultados reportados por Mena la boquilla oscilante modifica la orientación de las cadenas polimericas del material, lo cual se traduce en una variación de sus propiedades mecánicas En particular se encuentra un incremento en el esfuerzo maximo y en la deformación alcanzada para el esfuerzo máximo Por esta razón, resulta interesante investigar el efecto de las oscilaciones sobre fibras inmersas en el flujo oscilante con el objeto de visualizar las orientaciones inducidas y, por otra parte, la repercusion en las propiedades mecánicas del material extrudido

Para visualizar el efecto de la imposición de oscilaciones en el flujo del material viscoelástico, se utilizaron Fibras de Henequen (FH) las cuales se mezclaron con el PEBD en proporciones de peso del 7 5% y 15% respectivamente Las fibras de henequen fueron suministradas por el Centro de Investigaciones Cientificas de Yucatán (CICY) Las caracteristicas nominales de las fibras son. longitud de 1 3mm y diámetro promedio de 15μm con desviaciones estandares de 0 6 mm y 1 μm respectivamente [2]

3.1.1-- Descripción General del Proceso.

El equipo utilizado extrusor-boquilla oscilante-dado laminador para el estudio del flujo de material polimérico se muestra en la Figura 3 1

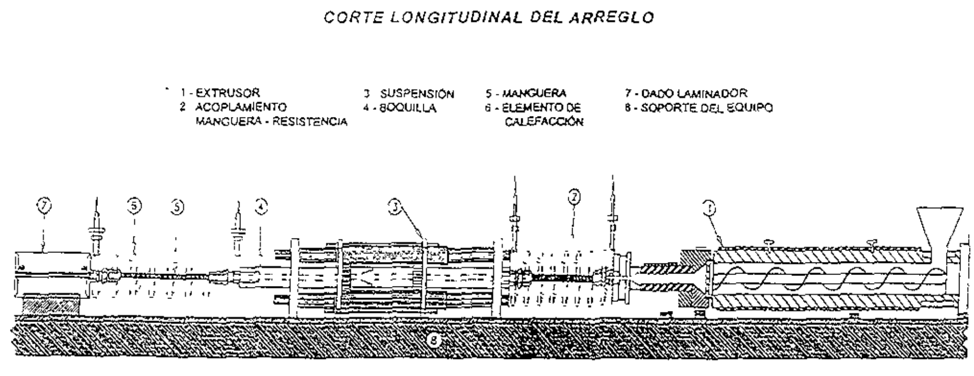


Fig 3 1 - Representación esquematica del sistema "Extrusor-Boquilla oscilante-dado"

En forma muy general, la descripción funcional del proceso desde que se introduce el polimero en forma de partículas sólidas hasta que emerge del dado laminador consiste de las siguientes etapas

1 *Transporte de sólidos por gravedad* El material sólido depositado en forma granular en la tolva del extrusor desciende hacia la parte inferior de ésta por efecto de su propio peso

2 *Transporte de solidos por arrastre* El polímero contenido en la tolva alimenta de manera continua al tornillo (husillo) que gira dentro del barril (camisa) estacionario Dicho barril genera una fuerza de fricción sobre el material granular evitando que éste gire junto con el husillo y lo obliga a moverse a lo largo del barril Al avanzar el polimero es compactado en un lecho sólido debido a la presión que se incrementa a medida que avanza el material, hasta compactarse lo suficiente para moverse como un flujo tipo tapón

3 *Fundicion* Cuando la temperatura del lecho solido alcanza el punto de fusión del polímero, se empieza a formar una pelicula delgada de polimero fundido El calor utilizado para la fusion proviene de la friccion del material con la paredes del barril-husillo y de las resistencias electricas que calientan al barril

4 *Transporte de material fundido* Cuando el polimero ha sido totalmente fundido el transporte de material es similar al flujo en una bomba de tornillo, generandose un flujo constante originado por el movimiento relativo del husillo respecto al cilindro

5. *Flujo oscilatorio*: El polímero completamente fundido ingresa, a través de un conducto flexible de teflon con diámetro interior de 6.8 mm, conectado a un conducto oscilante de acero inoxidable (boquilla oscilante) con una sección transversal circular de 6.8 mm de diámetro interno y 400 mm de longitud, la cual es mantenida a temperatura de pared constante

6. *Flujo para conformado*: En esta región (dado laminador) el flujo se mantiene a la misma temperatura de pared oscilante y pasa de una sección transversal circular, a una sección transversal rectangular en la forma menos brusca posible. De esta manera se obtienen tiras del material, lo cual facilita su posterior análisis

7. *Solidificación y laminado*: A la salida del dado laminador, el polímero se hace pasar a través de unos rodillos con el fin de enfriarlo a temperatura ambiente y de controlar su grosor final

Para generar los diferentes tipos de oscilación, la boquilla puede oscilar en dirección longitudinal y transversal mediante un sistema adecuado de ejes y rodamientos, y combinando ambos movimientos puede oscilar en forma helicoidal (figura 3.2)

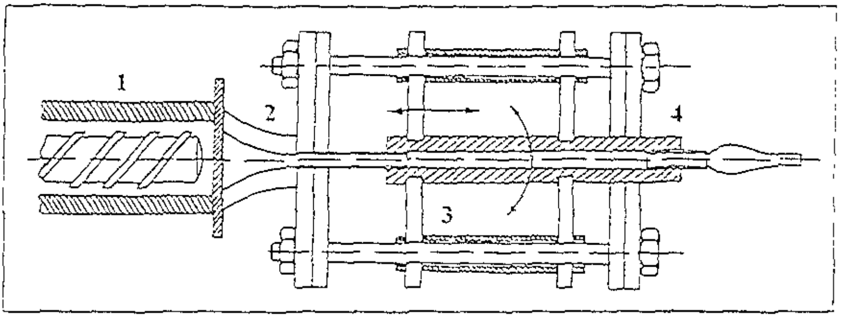


Figura 3.2 - Sistema de movimiento para la boquilla oscilante. 1) Extrusor, 2) Acoplamiento Extrusor-Boquilla, 3) Mecanismo de Oscilación Longitudinal-Angular 4) Boquilla

La boquilla esta conectada por medio de mecanismos de biela y manivela a dos motores de corriente directa, uno para cada modo de oscilación. Ambos motores controlan la velocidad con un 1% de precisión. El sistema boquilla oscilante se encuentra rodeado de resistencias eléctricas de calentamiento y controladas independientemente en cada zona por termopares tipo cobre-constantan

3.1.2.- Diseño del Experimento.

El experimento se realizó en la siguiente secuencia

1 El sistema "Extrusor-Boquilla oscilante-dado" se calienta durante un tiempo de 30-35 minutos, con el objeto de alcanzar la temperatura de extrusion (180 °C) y que permanezca estable en cada una de las partes del equipo

2 Una vez alcanzado el estado de temperatura estable en el punto anterior, se acciona el husillo del extrusor para que trabaje en vacio (sin material) durante un intervalo de 5 minutos, con el objeto de expulsar cualquier residuo de material

3 El material polimerico se coloca en la tolva para iniciar el proceso de extrusión

4 Se espera a que el flujo se estabilice (continuidad del flujo) por un período de tiempo de entre 5 y 10 minutos Después se guia al fluido hacia los rodillos laminadores los cuales se enfrian internamente al circular aire a presion a traves de ellos

5 Una vez alcanzado el regimen estacionario se inicia la recoleccion de muestras de tira polimerica generada bajo la condición de boquilla oscilante estatica, en seguida se inició el modo de oscilacion longitudinal de la boquilla, esperando alrededor de 5 minutos para iniciar nuevamente la recoleccion de la muestra correspondiente al tipo de oscilación longitudinal Se continua en la misma forma para la recoleccion de las muestras en los modos de oscilacion transversal y helicoidal

6 Las tiras polimericas obtenidas en el punto anterior, son pesadas con el objeto de calcular el flujo masico

7 De cada una de las tiras polimericas, se obtiene probetas por medio de un dado diseñado de acuerdo con la norma D[illegible] de ASTM. Con el objeto de investigar la isotropia del material en el efecto del tipo de oscilacion, las probetas son cortadas en cada una de las cuatro

direcciones con respecto a la dirección del flujo (0°, 45°, 90° y 135°) como se muestra en la figura 3 3

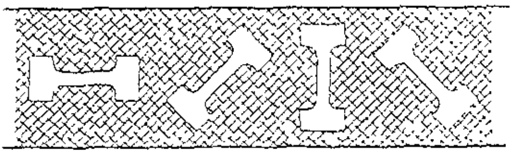


Figura 3 3 - Orientación de corte de las probetas con respecto a la dirección del flujo

8 - La probeta es medida en su ancho y espesor como lo estipula la norma ASTM D1708-84, en tres diferentes secciones de la zona de prueba con el fin de obtener un promedio de dichas dimensiones

9 - El conjunto de probetas caracterizadas en èl punto anterior, son sometida a pruebas mecánicas de tracción en una maquina Instron, de acuerdo con la norma ASTM D1708-84

10 -Finalmente, los resultados obtenidos para el flujo masico y propiedades mecánicas son recopilados para su analisis

La metodologia anterior se aplicó para obtener las muestras de probetas, considerando las siguientes proporciones en peso 100% de PEBD, 92 5% de PEBD y 7 5% de FH y 85% de PEBD y 15% de FH, manteniendo constantes los siguientes parámetros

1) Velocidad del husillo (100 r p m)
2) Diametro interior de la boquilla oscilante (6 4 mm)
3) Temperatura de extrusion (180 °C)
4) Temperatura de la boquilla oscilante (170 °C)
5) Longitud de la boquilla oscilante (400 mm)

3.1.3.- Resultados Experimentales.

3 1 3 *a* - Flujo Másico

En la tabla 3 3 aparecen los valores obtenidos para el flujo masico a través de la boquilla en las diferentes condiciones de oscilación (tabla 3 2) y para las diferentes concentraciones de PEBD-FH, con su respectiva variación porcentual con respecto al caso con la boquilla estatica

TABLA 3 3

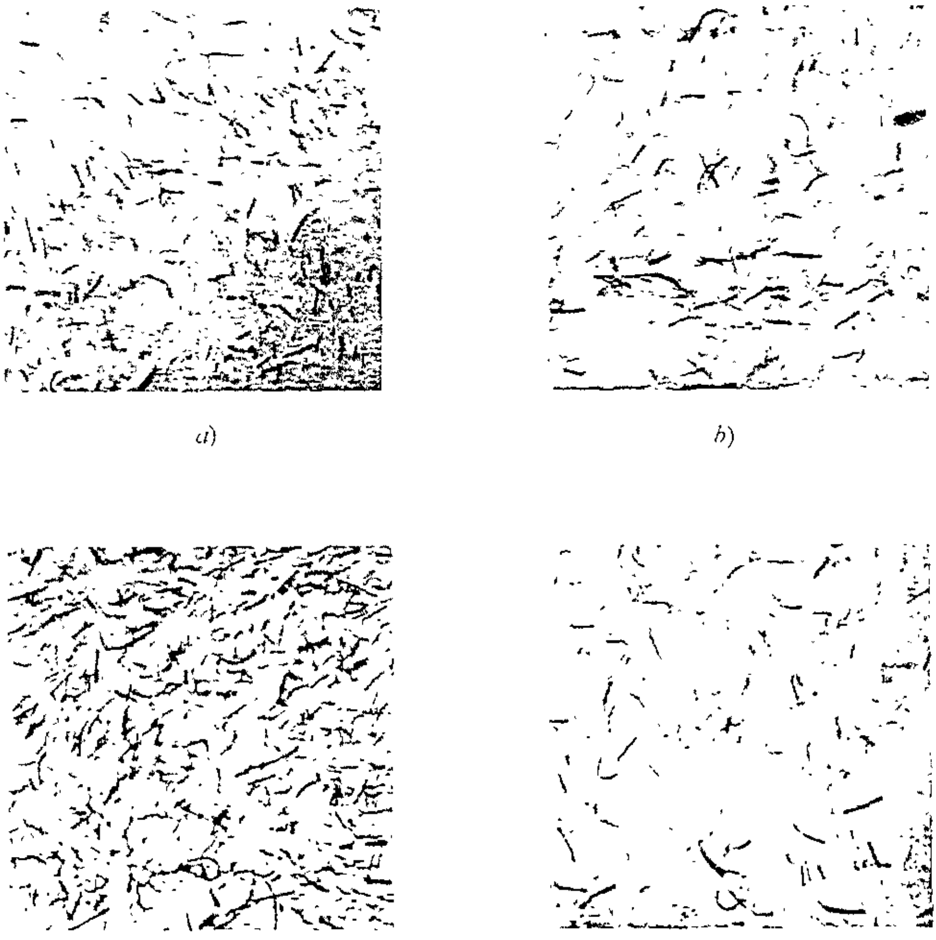
Polietileno de Baja Densidad 100%		
Tipo de oscilacion	Flujo masico (g/min)	Variación del flujo con respecto a la boquilla estática %
Sin Oscilación	27 84	
Longitudinal	28 18	1 22
Transversal	28 07	0 81
Helicoidal	28 84	3 59

Polietileno de Baja Densidad 92.5%-Fibras de henequen 7 5%		
Tipo de oscilacion	Flujo másico (g/min)	Variacion del flujo con respecto a la boquilla estatica %
Sin Oscilacion	28 09	
Longitudinal	29 37	4 55
Transversal	30 62	9 00
Helicoidal	30 65	9 10

Polietileno de Baja Densidad 85%-Fibras de henequén 15%		
Tipo de oscilacion	Flujo masico (g/min)	Variacion del flujo con respecto a la boquilla estatica %
Sin Oscilacion	32 05	
Longitudinal	34 44	7 45
Transversal	33 84	5 58
Helicoidal	[illegible]	[illegible]

3 1 3. *b* - Visualización del Flujo.

Para investigar el comportamiento del flujo, se analizaron algunas muestras del material extrudido (PEBD) utilizando las fibras de henequén (FH) como trazadores del flujo En la figura 3 4 *a-d* se presentan fotografías representativas para cada uno de los modos de oscilación, las cuales corresponden a una área de muestreo de 2 cm^2



a) *b*) *c*) *d*)

DIRECCION DEL FLUJO ⇒

[illegible] fotografías de la muestra PEBD [illegible] obtenidas bajo la condición [illegible]

Del total de 40 muestras analizadas para los diferentes tipos de oscilación, se presentan en la figura 3 4 las fotografías representativas del comportamiento general de orientación de las fibras de henequén en una matriz de PEBD En los casos Sin Oscilacion (SO) y con Oscilación Helicoidal (OH) como se muestra en las figuras 3 4-a y 3 4-d respectivamente, no se observa ninguna orientación preferencial de las fibras de henequén con respecto a la dirección del flujo En el caso de las muestras correspondientes al tipo de oscilación longitudinal (OL) como se observa en la figura 3 4-b, existen una orientación preferencial de la mayoria de las fibras las cuales forman un angulo comprendido entre 0° y 90° con respecto a la dirección del flujo En analogía con el caso anterior para las muestras obtenidas para el tipo de oscilación transversal (OT) como se puede ver en la figura 3 4-c, se tiene una orientación preferencial en la mayoría de las fibras las cuales forman un ángulo comprendido entre 30° y 90° con respecto a la dirección del flujo

3 1 3 c - Propiedades Mecánicas

Para las diferentes concentraciones de Polietileno de Baja Densidad (PEBD) y de Fibras de Henequén (FH), se considera los valores promedio del esfuerzo maximo y de la deformación al esfuerzo máximo, obtenido para la muestra de probetas cortadas en una direccion dada con respecto a la dirección del flujo y pertenecientes a un tipo de oscilación. Los valores de las propiedades mecanicas antes mencionadas, son comparados con la muestra homologa del caso sin oscilación Los resultados de las propiedades mecanicas de las probetas extrudidas de acuerdo con la metodología dada en el inciso 3 1 2, se muestran en las tablas A1 1-3 del Anexo A1

3.2.- Efecto de las Oscilaciones en la Disipación Viscosa.

El objetivo en esta parte experimental de la investigacion, es determinar la variacion de temperatura que experimenta el flujo por efecto de la disipacion viscosa debido a las oscilaciones de tipo longitudinal, para el caso en que el flujo entre a la boquilla oscilante a la misma temperatura que se tiene en la pared de dicha boquilla

Para llevar a cabo la medicion y control de temperatura en la pared de la boquilla se diseño construyo e instrumento la boquilla oscilante que se describe en la siguiente seccion

3 2 1 - Diseño e Instrumentación de la Boquilla Oscilante

El sistema de boquilla oscilante descrito en la sección 3 1 1 se utilizó para realizar las pruebas experimentales reportadas en la sección 3 1 3 del presente proyecto de investigación, con algunos problemas de fugas de polímero fundido en los acoplamientos boquilla oscilante-manguera-extrusor y el movimiento forzado ocasionado por el desajuste entre los pernos guia con los deslizadores en el sistema de suspensión [4, 24] Con el objeto de corregir las fugas del fluido y el forzamiento de la oscilación, se eliminó la manguera flexible y el sistema de suspensión, acoplando directamente la boquilla oscilante en el dado colocado a la salida del extrusor como se muestra en la figura 3 5, con la ventaja de que ésta es una modificación relativamente fácil de implementar en los extrusores convencionales utilizados en la industria

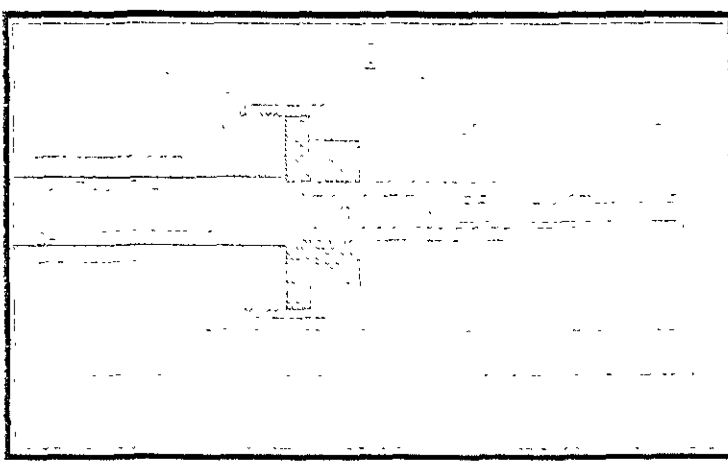


Figura 3 5 - Sistema de acoplamiento para la boquilla oscilante 1, 2, 3) Acoplamiento extrusor-dado 4) Dado de extrusion, 5) Boquilla oscilante

La boquilla oscilante se construyo de acero inoxidable, con un diametro interior de 6 4 mm, con acabado especular, un diametro exterior de 12 7 mm y una longitud total de 300 mm El ensamble tipo hembra-macho entre el dado y la boquilla se hizo con una tolerancia de [illegible] mm suficiente para evitar las fugas del material y permitir el movimiento de la boquilla

La oscilación longitudinal de la boquilla se generó, mediante un mecanismo biela-manivela conectado a un motor de corriente directa, como se muestra en la figura 3 6

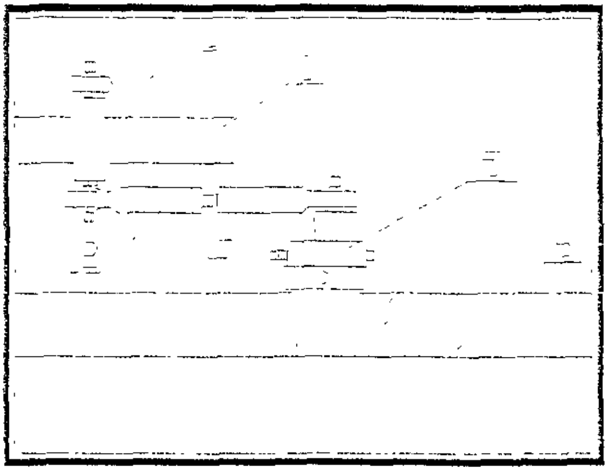


Figura 3 6 - Sistema de movimiento para la boquilla oscilante 1) Soporte boquilla 2) Biela 3) Boquilla 4)Acoplamiento biela- Manivela 5) Manivela 6) Motor

El control y medición de la temperatura de pared en la boquilla se hizo mediante el uso de termopares tipo T (cobre-constantan), los cuales son apropiados para el rango de temperaturas del experimento (0 - 350) °C En la figura 3 7 se muestra la posición de los termopares colocados en la pared de la boquilla oscilante y separados entre si por una distancia de 25 mm Los termopares utilizados son de tipo "cabeza desnuda", calibre 40 AWG (0 08 mm) con tiempo de respuesta del orden de 0 1 seg y con error asociado de ± 0 5 °C [52] La cabeza del termopar es colocada en perforaciones de 1 6 mm de diametro y profundidades de 2 5 mm hechas sobre la pared de la boquilla, inmersa en grasa de silicon con el objeto de lograr un mejor contacto termico pared-cabeza, con parte de los alambres cobre-constantan enrollados dentro de dicha perforacion con el fin de reducir el efecto de borde

Los termopares [illegible] en la figura 3 7 se utilizaron para controlar [illegible] que mantienen [illegible] de la boquilla a temperatura constante y los termopares con número par se usaron para la medición y determinación de la temperatura promedio en la pared El registro de las temperaturas se hizo utilizando una tarjeta de adquisición de datos PCL-812 con capacidad para 16 canales instalada en una computadora PC-486

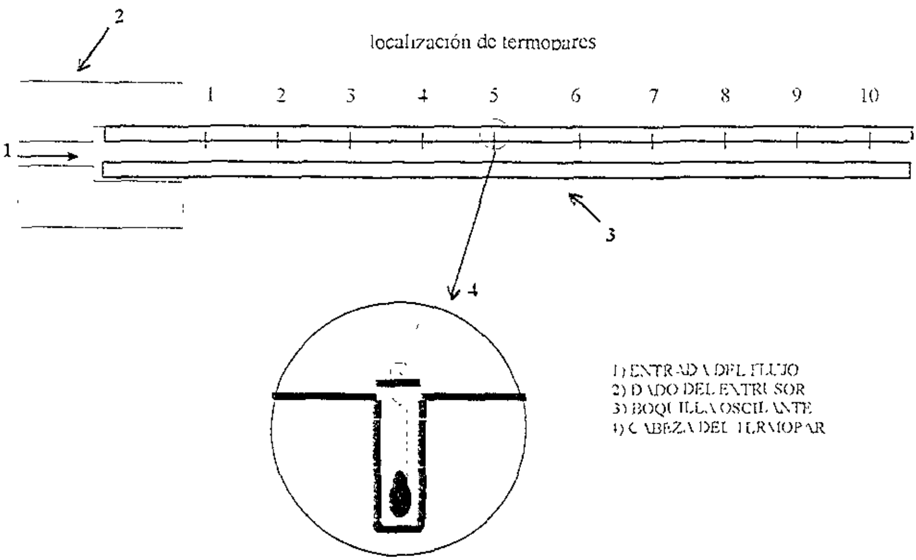


Figura 3 7 - Instrumentación de la boquilla oscilante con termopares tipo cobre-constantan para medición y control de la temperatura de pared

El control de la temperatura de pared, se hizo por medio de 3 resistencias eléctricas de tipo flexible con una potencia en cada una de 120 W Las resistencias con forro de tela de asbesto se colocaron alrededor de la boquilla para controlar de manera independiente la temperatura, mediante controladores de temperatura tipo OMROM modelo E5CJ

3 2 2 - Diseno del Experimento

La metodología experimental utilizada para determinar la variación de temperatura en el flujo se realizó en la siguiente secuencia

1. El sistema "Extrusor-Dado-Boquilla oscilante" se calienta durante un tiempo de 30-35 minutos para alcanzar la temperatura de extrusión (160 °C) y que esta permanezca constante

2. Una vez alcanzado el estado de temperatura estable se acciona el husillo del extrusor para que trabaje en vacio (sin material) durante un intervalo de 10 minutos con el objeto de expulsar cualquier residuo de material alojado en el husillo

3. Se coloca el material polimerico en la tolva para iniciar el proceso de extrusion

4. Se opera el extrusor por un período de tiempo de 20 minutos bajo la condición de boquilla estática para permitir que se estabilice el flujo y se mide el flujo másico de material extrudido, con el husillo rotando a una frecuencia de 30 r p m

5. La temperatura del fluido se registro al final de la boquilla en el centro del conducto mediante un termopar tipo cobre-constantan bajo la condición de boquilla estática durante un periodo de tiempo de 30 minutos

6. Para el tipo de oscilación longitudinal se eligió la amplitud y la frecuencia de oscilación de la boquilla en el rango de valores reportado por Mena [8], de acuerdo con las combinaciones frecuencia-amplitud (ω, A) dadas en la tabla 3 4

TABLA 3 4

Combinaciones frecuencia-amplitud (ω, A) para la oscilacion longitudinal de la boquilla

AMPLITUD A (mm)	1	2	3	4	5
FRECUENCIA ω (Hz)					
1	(1-1)	(1-2)	(1-3)	(1-4)	(1-5)
2	(2-1)	(2-2)	(2-3)	(2-4)	(2-5)
3	(3-1)	(3-2)	(3-3)	(3-4)	(3-5)
4	(4-1)	(4-2)	(4-3)	(4-4)	(4-5)
5	(5-1)	(5-2)	(5-3)	(5-4)	(5-5)
6	(6-1)	(6-2)	(6-3)	(6-4)	(6-5)
7	(7-1)	(7-2)	(7-3)	(7-4)	(7-5)
8	(8-[illegible])	(8-[illegible])	(8-3)	(8-4)	(8-5)
9	(9-1)	(9-2)	[illegible]	(9-4)	[illegible]
10	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]-4	(10-5)

Con la boquilla estática, se ajustó la amplitud de oscilación A y se inició la oscilacion longitudinal de boquilla con la frecuencia w más baja (1Hz) Después se ajustó la frecuencia de rotacion del husillo para mantener el flujo másico con el valor registrado en el punto 4 esperando un tiempo de estabilización de 20 minutos para registrar la temperatura del fluido a la salida de la boquilla en la parte central del conducto

7 Sin detener el movimiento oscilante de la boquilla, se mantiene constante la amplitud de oscilacion y se incrementa la frecuencia de oscilación al siguiente valor mostrado en la tabla 3 4, repitiendo el procedimiento descrito en el punto 6, hasta terminar con la frecuencia maxima (10Hz)

8 Al modificar la amplitud de oscilacion A, se repite el procedimiento a partir del paso 6, hasta terminar con todas las combinaciones dadas en la tabla 3 4

La metodologia anterior se aplicó para los casos de boquilla estática y con oscilaciones de tipo longitudinal, utilizando polietileno de baja densidad (PEBD) como fluido de trabajo y manteniendo constantes los siguientes parámetros

1 Flujo masico ($15X10^{-8}$ kg / s)
2. Temperatura de extrusión (160 °C)
3 Temperatura de pared de la boquilla oscilante (160 °C)

3 2 3 - Resultados Experimentales

En el planteamiento del problema para obtener la solucion analítica de la transferencia de calor por disipacion viscosa en el flujo oscilante, se consideró la condicion de temperatura de pared constante en la boquilla, sin embargo, experimentalmente se tiene una variación (ΔT) en el control de dicha temperatura Durante todos los experimentos se registró la temperatura de pared por medio de los termopares instalados en las posiciones mostradas en la figura 3 [illegible] a intervalos de tiempo de 5 segundos con fluctuaciones maximas con respecto a la temperatura promedio (160 °C) del orden de [illegible] °C para el caso de boquilla estatica [illegible] °C para la boquilla oscilante lo que corresponde en ambos casos a variaciones extremas menores del 1% con respecto a la temperatura promedio, en ambos casos se tienen distribuciones de tipo normal con desviaciones estándares de ± 0 62 °C y ± 0 83 °C respectivamente

La variación de temperatura del fluido a la entrada de la boquilla oscilante, se registro por medio de un termopar colocado a la entrada y en el centro de la boquilla En este caso se tiene una fluctuacion máxima con respecto a la temperatura promedio (60 °C) de ± 1 16 °C para el caso de boquilla estatica y del orden de ± 1 33 °C para la boquilla oscilante y desviaciones estandares de ± 0 71 °C y ± 0 89 °C respectivamente, y con variaciones extremas en ambos casos menores del 1% con respecto a la temperatura promedio

3 2 3 c - Disipación viscosa por efecto de las oscilaciones

En esta sección se presentan los datos de la temperatura adimensional θ del flujo para las diferentes condiciones de operacion de la boquilla oscilante, la cual se define en la forma

$$\theta = \frac{T - T_i}{T_0} \tag{3 1}$$

donde T es la temperatura del fluido que se mide a la salida de la boquilla en la parte central del conducto, y T_0 es la temperatura en la pared de la boquilla

Una vez que se determina la variación que se tiene en la medicion de las temperaturas de pared y del fluido a la entrada de la boquilla, bajo condiciones de boquilla estatica y oscilante, en la tabla 3 5 se muestran los resultados experimentales obtenidos para la temperatura promedio θ registrada en cada una de las combinaciones de oscilacion de la boquilla, de acuerdo con la tabla 3 4 La temperatura θ correspondiente a las combinaciones frecuencia-amplitud (1,1), (1-2), (1,3), (2,1), (2,2) y (3,1) no fue posible determinarla, dado que el incremento de temperatura T-T , no excedio el rango de error de medicion experimental

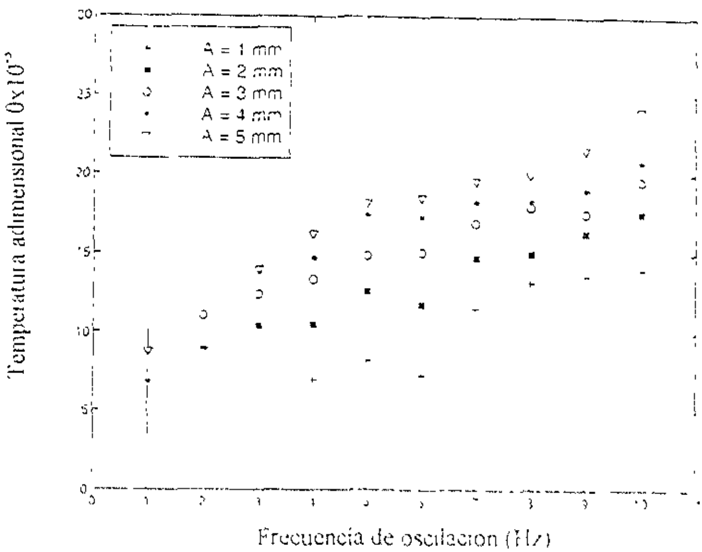
TABLA 3 5

Temperatura promedio $\theta \times 10^{-3}$ obtenida para cada uno de los modos de oscilación longitudinal (frecuencia-amplitud) de la boquilla, con su respectiva desviacion estándar

AMPLITUD A (mm)

FRECUENCIA ω (HZ)	1	2	3	4	5
1	----------	----------	----------	6 87±4 56	8 81±4 25
2	----------	----------	11 07±5 02	8 97±4 72	8 84±5 56
3	----------	10 44±4 10	12 43±3 56	13 81±3 94	14 01±3 81
4	7 02±4 92	10 55±4 57	13 38±4 05	14 73±4 06	16 27±5 06
5	8 25±5 06	12 62±4 25	14 87±3 87	17 44±3 44	18 19±4 96
6	7 31±4 06	11 78±5.76	15.07±4 27	17 31±4 08	18 53±4 09
7	11 56±3 94	14 75±3 69	16 93±4 00	18 25±3 81	19 62±4 44
8	13 2±3 47	15 03±3 43	17 97±3 96	18 33±3 51	20 05±3 98
9	13 65±3 09	16 34±3 87	17 57±4 04	19 05±4 36	21 63±4 13
10	14 0±3 62	17 56±3 50	19 63±4 56	20 81±4 37	24 12±4 69

En las figuras 3 8 y 3 9 se representan graficamente los datos de la tabla 3 5 considerando θ en funcion de las frecuencias de oscilación ω y de las rapideces de oscilacion α, respectivamente



[illegible] Temperatura promedio del fluido a la salida de la boquilla en funcion de las frecuencias de oscilacion para cada una de las amplitudes de oscilacion

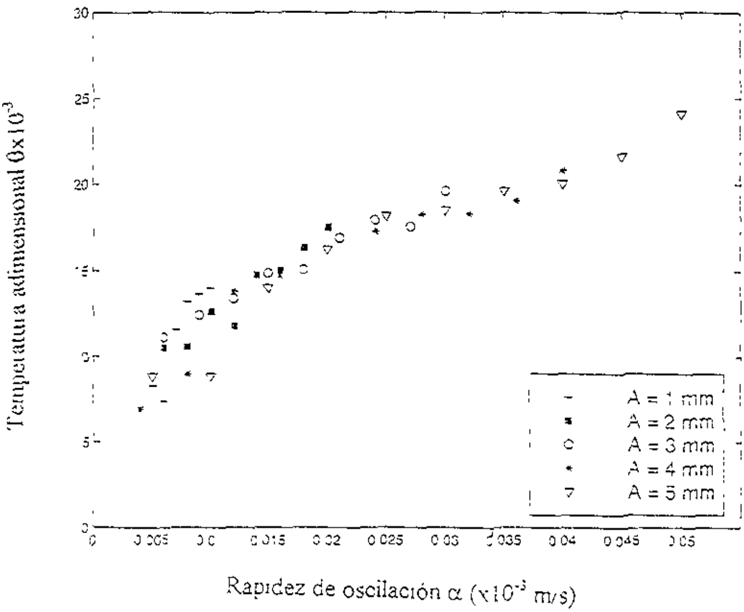


Figura 3.9. – Temperatura promedio del fluido θ a la salida de la boquilla, en función de las rapideces de oscilación α para cada una de las amplitudes de oscilación A

En el siguiente capítulo se discute la información experimental antes presentada, la cual servirá para validar los modelos Viscoelástico Lineal (Oldroyd-Maxwell) y Newtoniano Generalizado (Ostwald de Waele)

CAPITULO IV.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos para el incremento de flujo masico y la alteracion de las propiedades mecanicas del material extrudido, por efecto de las oscilaciones de tipo longitudinal, transversal y helicoidal Por otra parte, se considera la influencia de la concentracion de las fibras de henequen en el material extrudido, las cuales fueron utilizadas como trazadores del flujo oscilante Finalmente, se hace un análisis teorico-experimental de la transferencia de calor que se genera por disipación viscosa en el flujo oscilante debido a la rapidez de oscilacion longitudinal de la boquilla En en el análisis teorico se consideran las soluciones analíticas obtenidas para la transferencia de calor por disipacion viscosa en el flujo viscoelástico de acuerdo con los modelos viscoelástico lineal y newtoniano generalizado considerando las ecuaciones constitutivas de Oldroyd y Ostwald de Waele respectivamente Analizamos tambien la importancia de la contribución elastica y viscosa en la disipacion viscosa de acuerdo con dichos modelos En la última parte del analisis se validan las soluciones de los modelos antes mencionados con los resultados experimentales obtenidos para la disipacion viscosa en el flujo oscilante

4.1. - FLUJO VISCOELASTICO OSCILATORIO.

4 1 1 Flujo Másico

En la figura 4 1 se muestra el promedio de flujo masico obtenido para el material polimérico extrudido en los diferentes tipos de oscilacion de acuerdo con la tabla 3 1 y para cada una de las proporciones de concentración masica Polietileno de Baja Densidad puro (PEBD100%), 92 5% de Polietileno de Baja Densidad y 7 5% de Fibras de Henequen (PEBD92.5%-7 5%FH) y 85% de Polietileno de Baja Densidad y 15% de Fibras de Henequén (PEBD85%-15%FH)

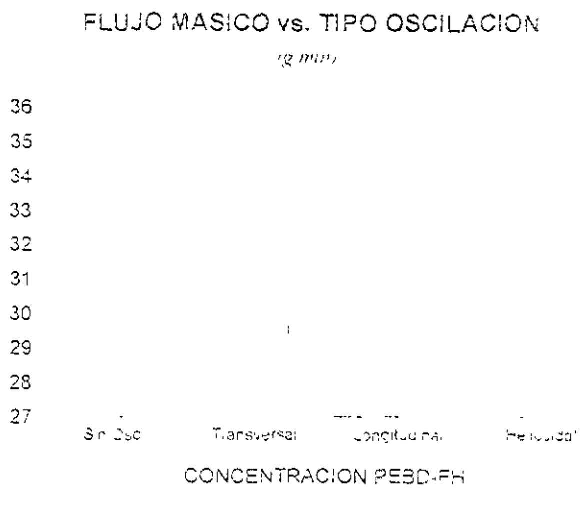


Figura 4 1 -Flujo masico de material viscoelastico en la boquilla oscilante en funcion de la concentracion PEBD y Fibras de Henequen y del tipo de oscilacion SO-Sin Oscilacion, OL - Oscilacion Longitudinal OT-Oscilacion Transversal y OH-Oscilacion Helicoidal

Como se puede observar en dicha figura, en todos los experimentos realizados con la boquilla oscilante, se obtuvo un incremento de flujo masico con respecto al flujo que se tiene en condiciones de boquilla estatica Los incrementos de flujo muestran ademas una dependencia con la concentracion de fibras en el material polimerico, alcanzando incrementos maximos [illegible] PEBD85-

FH15 y PEBD92.5-FH7.5% respectivamente, en ambos casos para el tipo de oscilación helicoidal. Para el caso de PEBD puro el incremento máximo de flujo másico fue de 3.6%, para la oscilación de tipo helicoidal.

El flujo másico se incrementa por efecto de la oscilación de la boquilla, siendo principalmente alterado por la oscilacion de tipo helicoidal. También parece ser afectado por la concentracion de fibras de henequén, aunque deben realizarse experimentos con un rango de concentraciones más amplio y de tomar en cuenta la compatibilidad matriz-fibra [30]. El incremento del flujo másico por efecto de la oscilación, está de acuerdo con los resultados reportado por Mena et al. [8,37,38], el cual atribuye dicho incremento de flujo a la disminución de la viscosidad aparente de un fluido sometido a diferentes rapideces de corte.

4.1.2 - Propiedades Mecánicas del Material Extrudido

En el Anexo I se presentan los datos obtenidos para las propiedades mecánicas (esfuerzo máximo y deformacion al esfuerzo maximo), de una muestra de probetas extrudidas y ensayadas con PEBD100% y con las dos concentraciones de fibras de henequen (PEBD92.5%-7.5%FH y PEBD85%-15%FH), en los diferentes tipos de oscilacion (longitudinal,transversal y helicoidal) y para las diferentes direcciones de corte de las probetas con respecto a la dirección del flujo (0^0, 45^0, 90^0 y 135^0).

En cada una de las siguientes figuras (para una concentración dada de PEBD-FH) se discute el comportamiento de la propiedad mecanica en cuestion (Esfuerzo Máximo o Deformación al esfuerzo Maximo) que aparece graficada en forma de barras, las cuales son divididas en cuatro grupos, de acuerdo con el modo de oscilacion (Sin oscilacion-SO, Transversal-OT, Longitudinal-OT y Helicoidal-OH) y cada grupo a su vez es subdividido en cuatro subgrupos, de acuerdo con la direccion de corte de las probetas, con respecto a la direccion del flujo (0^0, 45^0, 90^0 y 135^0). En cada caso los valores extremos (incrementos y/o decrementos maximos) de las propiedades mecanicas para la muestra sometida a un tipo de oscilacion son comparados con la muestra homologa del caso no-oscilacion.

Esfuerzo Máximo

Caso 1 PEBD100%

En la gráfica 4 2 se observa que para todos los tipos de oscilación resultaron incrementos del esfuerzo máximo, menores del 5% con respecto al caso sin oscilación, alcanzando sus valores máximos en los modos de oscilación transversal para probetas con orientación paralela (0°) y perpendicular (90°) a la dirección del flujo, con incrementos porcentuales del 3 4% y 4 1% respectivamente De la misma manera, se obtuvo el valor extremo para el esfuerzo máximo en el modo de oscilacion helicoidal en las probetas con orientaciones de corte perpendicular (90°) al flujo, con incremento porcentual del 4 9%

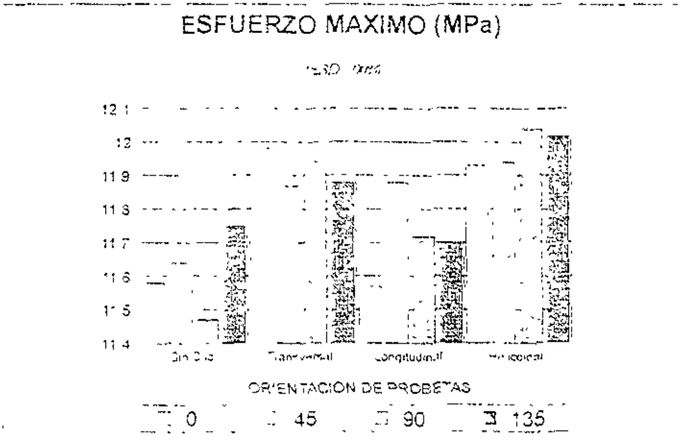


Figura 4 2 - Magnitud del esfuerzo maximo para PEBD 100% en funcion del tipo de oscilacion y de la orientacion de corte de las probetas

Las probetas obtenidas en todos los casos con oscilaciones mostraron valores mayores a los obtenidos en el caso estatico

Caso 2 PEBD92 5%-FH7 5%

En contraste con el caso anterior, en este caso como se puede ver en la figura 4 3, se encuentra un decremento del esfuerzo maximo en todas las muestras con respecto al caso sin oscilaciones, obteniéndose nuevamente los valores extremos en los tipos de oscilacion transversal y helicoidal, con porcentajes del orden de -36 2% y -33 7% respectivamente, en las probetas con orientación de corte perpendicular al flujo

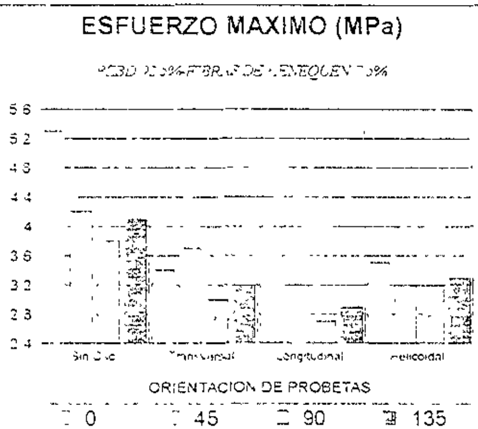


Figura 4 3 - Magnitud del esfuerzo maximo para la concentracion PEBD 92 5%-FH 7 5% en funcion del tipo de oscilacion y de la orientación de corte de las probetas

Caso 3 PEBD85%-FH15%

En este caso, la muestra de probetas obtenidas para el tipo de oscilacion helicoidal y ensayadas con direcciones de corte perpendiculares (90°) y formando un angulo de 135 ° con respecto a la direccion del flujo son las que presentaron un mayor incremento en el esfuerzo máximo con respecto al caso de la muestra de probetas no osciladas, con una variación máxima del 15%, como se puede observar en la figura 4 4

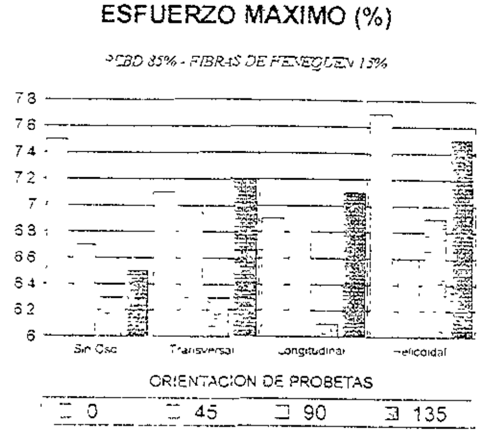


Figura 4 4 - Magnitud del esfuerzo maximo para la concentracion PEBD 85%-FH 15% en función del tipo de oscilacion y de la orientación de corte de las probetas

Deformación Maxima

Caso 4 PEBD100%

El comportamiento de la deformacion al esfuerzo maximo representado en la figura 4 5, muestra un comportamiento inconsistente (incrementos y decrementos) con respecto al caso sin oscilación, alcanzando sus valores extremos en los modos de oscilacion longitudinal y helicoidal para las probetas con orientacion de corte perpendicular al flujo (90 °) en ambos casos, con incrementos y decrementos del 6% y con un incremento entre 4% y 2% en las probetas con orientaciones paralelas al flujo (0 °) para los tres tipos de oscilacion

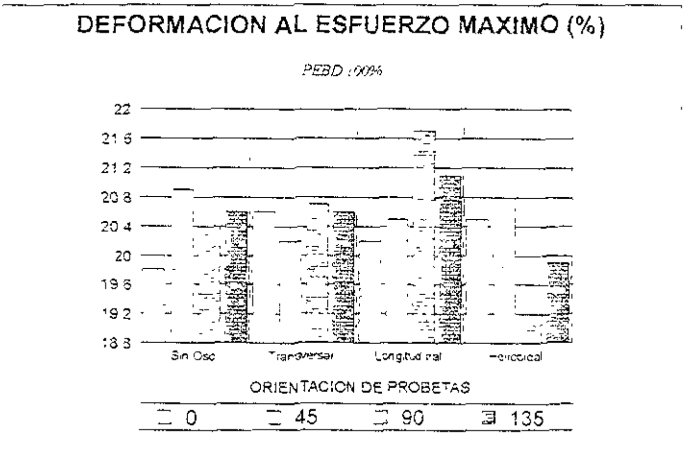


Figura 4 5 - Magnitud de la deformacion al pico, para PEBD 100% en función del tipo de oscilación y de la orientación de corte de las probetas.

Caso 5 PEBD92 5%-FH7 5%

Con esta concentracion, se encuentra un incremento de la deformacion al pico en todos los tipos de oscilación con respecto al caso sin oscilación (figura 4 6), obteniéndose los valores maximos en los tres tipos de oscilación longitudinal, transversal y helicoidal, con porcentajes de 53%, 43%, y 33% respectivamente, en las probetas con orientaciones de corte de 135°

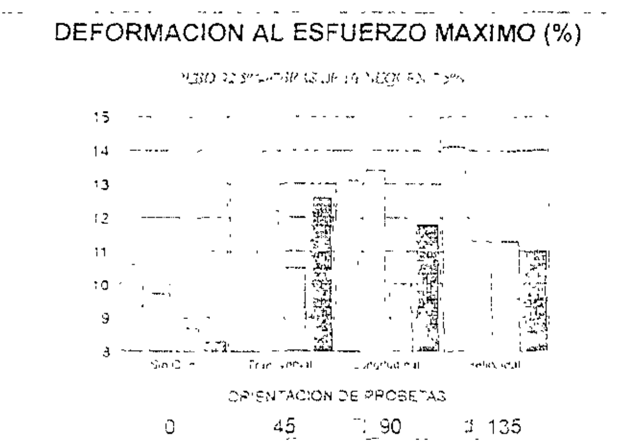


Figura 4 6 - Magnitud de la deformacion al pico, para la concentracion PEBD 92 5%-FH7 5%, en funcion del tipo de oscilacion y de la orientacion de corte de las probetas

Caso 6 PEBD85%-FH15%

En la figura 4 7 se observa que la muestra con oscilación de tipo helicoidal y un ángulo de corte de 90° presento una deformación máxima del 23% con respecto al caso no oscilado, mientras que el resto de las muestras no variaron por arriba del 11%, presentándose decrementos de la deformación al pico de hasta un 15% en las muestras sujetas a oscilaciones transversales con ángulos de corte de 0 ° y 45 ° respectivamente

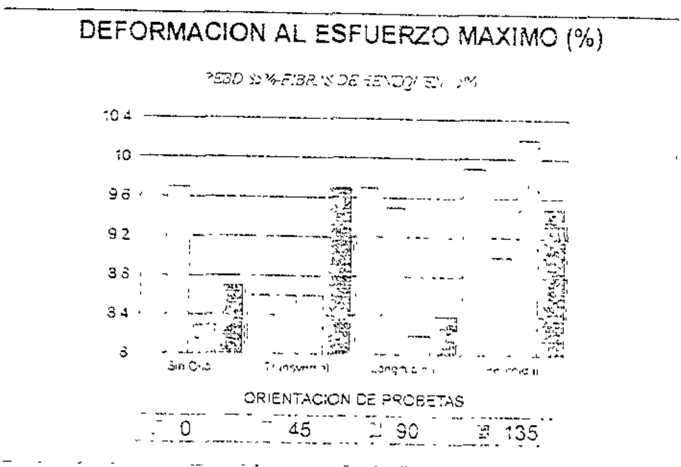
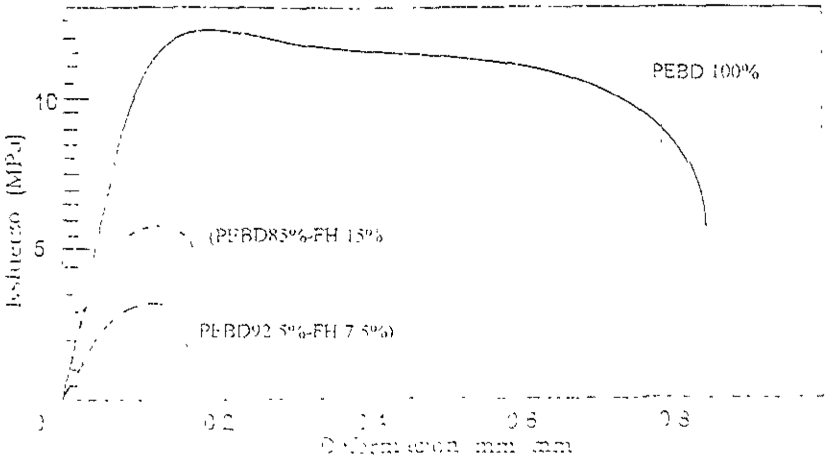


Figura 4 7 - Magnitud de la deformacion al pico para la concentracion PEBD 85%-FH 15% en funcion del tipo de oscilacion y de la orientacion de corte de las probetas

De acuerdo con los resultados presentados, podemos observar que existe una diferencia entre las propiedades mecanicas de las probetas del material oscilado y no oscilado, en funcion de los diferentes tipos de oscilacion y de las diferentes direcciones de corte, obteniendo valores extremos para el esfuerzo maximo del orden de un 12% para el caso de la oscilacion de tipo helicoidal en probetas con orientacion paralela al flujo y de un 6% para la oscilacion de tipo longitudinal en probetas con orientacion transversal al flujo, y deformaciones a la ruptura extremas de un 35% para la oscilacion de tipo helicoidal en probetas con orientaciones de corte paralela al flujo y de un 24% para la oscilación transversal en probetas con orientaciones de corte transversales al flujo

Los resultados obtenidos en cuanto al comportamiento mecánico, indican que el material extrudido no es isotropico y muestra una dependencia con respecto al tipo de oscilacion. Por otra parte, como se observó en la orientación inducida en las fibras de henequen utilizadas como trazadores del flujo (sección 3.1.3 *b*), existe una reorientacion de las fibras de henequén en el PEBD extrudido por efecto del tipo de oscilación de la boquilla oscilante, como se ha discutido por Herrera y Mena [17,25,26], sin embargo, los valores obtenidos para el esfuerzo maximo resultaron en todos los casos mayores en el PEBD100%, con respecto al esfuerzo maximo obtenido en el material compuesto con fibras de henequen como se puede ver en la figura 4.8, donde se muestra la curva esfuerzo-deformacion para el caso de probetas sometidas a oscilaciones de tipo helicoidal y con direcciones de corte paralelo al flujo. Este comportamiento es inesperado dado que la resistencia del material compuesto debería ser mayor a la del material puro debido a que las fibras de henequen tienen una resistencia mayor que la matriz, como se ha reportado en varios trabajos de investigacion [2,9]



[illegible]

Con el objeto de analizar la interfaz matriz-fibra, se observaron algunas muestras del material extrudido en el microscopio electrónico En la figura 4 9 se muestra una fotografia donde aparecen huecos en dicha interfaz, lo cual puede explicar la disminución del esfuerzo maximo y el aumento en la deformación al esfuerzo máximo en todas las probetas extrudidas con fibras La explicación de la formacion de estos huecos puede deberse a que las fibras no tuvieron la preparación inicial adecuada o que durante el intervalo de tiempo transcurrido entre el secado de las fibras y su utilización, estas se hidrataron, ocasionando la formación de cavidades de vapor de agua en la matriz del PEBD durante el proceso de extrusión

Figura 4 9 - Fotografía en que se muestra la formación de porosidades en el material compuesto matriz-fibra

4.2.- TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL FLUJO VISCOELASTICO OSCILATORIO.

En esta seccion se analiza la transferencia de calor por efecto de disipación viscosa en el flujo oscilante, utilizando las soluciones para los perfiles de temperatura obtenidos con los modelos viscoelástico lineal y newtoniano generalizado. Finalmente se validan los resultados teoricos con los resultados experimentales, utilizando el PEBD como fluido de trabajo

Con el objeto de validar los resultados teoricos con los experimentales, el analisis de la disipacion viscosa en el flujo oscilante se hace mediante la temperatura adimensional global $\theta_b = (T_b - T_w)/T_w$ la cual nos relaciona la variación de temperatura del flujo por efecto de disipación viscosa, donde T_w es la temperatura de pared de la boquilla, que es la misma temperatura con que ingresa el fluido y T_b es la temperatura global del flujo dentro de la boquilla definida en la forma

$$T_b = \frac{\int_0^a V_z T_p\, r\, dr}{\int_0^a V_z\, r\, dr} \tag{4.1}$$

donde, V_z y T_p, son los perfiles de velocidad y de temperatura respectivamente, que han sido resueltos para los modelos considerados en el presente trabajo

En todos los casos se considera dentro de la boquilla un flujo térmicamente desarrollado, con un gradiente de temperatura constante en la direccion axial Para tener una idea de la magnitud de dicho gradiente, se hace un análisis de orden de magnitud del gradiente de temperatura axial $\Delta T/\Delta z$ generado por disipacion viscosa en un flujo laminar, desarrollado y en estado permanente en una tubería de seccion transversal circular, caracterizado por un numero de Reynolds oscilante $Re_\omega = \langle V \rangle D/\nu$ donde $\langle V \rangle$ es la rapidez de oscilacion $\alpha \; \omega A$, D es el diámetro interior de la boquilla y ν la viscosidad cinematica del fluido Bajo estas condiciones se deduce que

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta z}\right)_{disipación\ viscosa} \sim O\left(\frac{32\,Re\,\nu}{[illegible]}\right) \tag{4.2}$$

lo cual da un gradiente de temperatura axial máximo del orden de 8 °C/m, considerando las propiedades características de los materiales poliméricos comúnmente utilizados en procesos de extrusión y para las condiciones de diseño y operación de la boquilla oscilante utilizada en la presente investigacion En el experimento realizado, para el caso particular de la extrusión de PEBD y para las condiciones de operación de la boquilla oscilante (Tabla 3 4), no fue posible determinar la magnitud de dicho gradiente de temperatura axial en el flujo oscilante, dado que la incertidumbre en la medicion de temperatura resultó del orden de ± 0 5 °C, lo que nos hace suponer una variacion de temperatura axial en el flujo dentro de la boquilla menor o igual a dicha magnitud en una longitud de 300mm, o sea $\Delta T/\Delta z \leq 1.5$ °C/m. De esta forma se estima cualitativamente el rango en el que se encuentra el valor del gradiente de temperatura axial en el término convectivo de la ecuación para la transferencia de energía el cual, como se discute mas adelante, tiene una contribución importante en la solución obtenida para cada uno de los modelos bajo estudio

4 2 1 - Modelo Viscoelastico Lineal

En este modelo se utiliza la solucion obtenida para el caso particular del modelo de Oldroyd (ecuacion 2 21) para analizar el comportamiento de la temperatura adimensional global θ_b dado por la ecuacion 4 2, considerando las propiedades características del PEBD, el cual a una temperatura de trabajo de 160 °C esta caracterizado por un tiempo de relajacion λ_1 de 5 5 s y un tiempo de retardamiento λ_2 del orden de 10^{-1}s (Tabla 3 1) En la figura 4 10 se muestra el comportamiento de la temperatura adimensional global del flujo oscilante θ_b, en función de la frecuencia de oscilacion ω, bajo las condiciones anteriormente establecidas En dicha figura aparecen las curvas correspondientes a tres valores constantes de gradiente de temperatura axial $\Delta T/\Delta z$ (0, 1,5 °C/m y 10 °C/m) Para cada gradiente de temperatura las curvas continuas representan a la maxima amplitud de oscilacion de la boquilla ($A = 5\times10^{-3}$m) y las curvas discontinuas denotan la minima amplitud ($A=1\times10^{-3}$m) En todos los casos la curva correspondiente a un gradiente de temperatura muestra un aumento en la temperatura adimensional global θ_b conforme se incrementa la frecuencia de oscilacion ω Los valores mas altos de incremento de temperatura corresponden a la curva con gradiente de temperatura axial cero Por otra parte resulta interesante notar que la dependencia de la

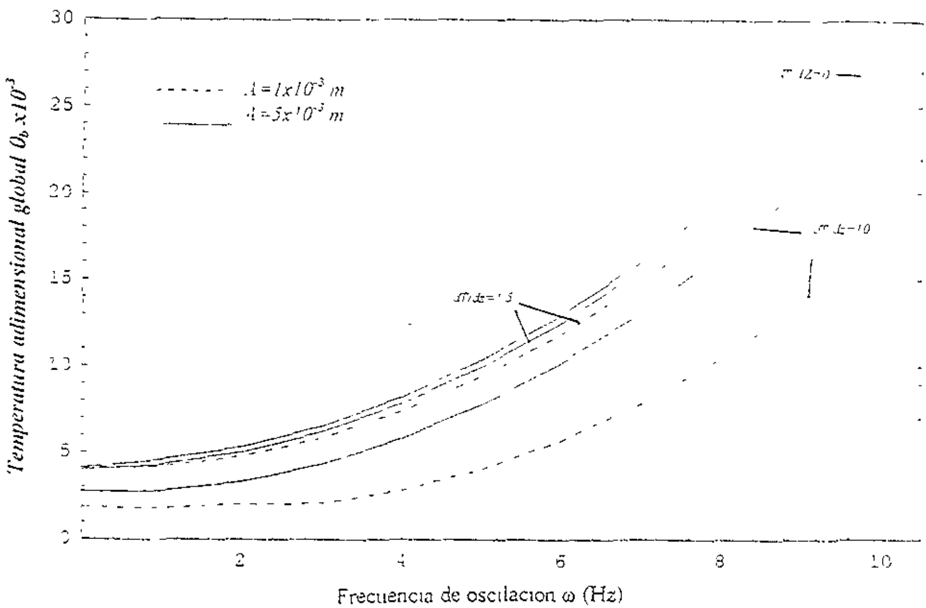


Fig. 4.10.-Grafica de la temperatura adimensional global θ_b en funcion de la frecuencia de oscilacion ω para tres valores del gradiente de temperatura axial $\Delta T/\Delta z$ (0, 1.5 °C y 10 °C/m), mostrando en cada caso los valores extremos de la amplitud de oscilación de la boquilla (línea continua-$5x10^{-3}$m y línea a trazos$1x10^{-3}$m)

temperatura adimensional global θ_b con la amplitud de la oscilación aumenta conforme se incrementa el valor del gradiente de temperatura axial y la frecuencia de la oscilacion, siendo ésta practicamente independiente de la amplitud para el caso de un gradiente de temperatura axial nulo

De acuerdo con el modelo de Oldroyd, para un gradiente de temperatura axial constante y con un valor de $\Delta T/\Delta z$ = 1.5 °C/m, el modelo predice que la variación de la temperatura global adimensional θ_b es prácticamente independiente de la amplitud de oscilacion. La diferencia de θ_b es del orden de un 4% entre la maxima y la minima amplitud de oscilacion

La validación de la temperatura adimensional global θ_b en función de la rapidez de oscilación α con los datos experimentales se muestra en la figura 4 11 donde observamos que a baja rapidez de oscilacion (α < 25x10-3 m/s), el modelo de Oldroyd predice apropiadamente los

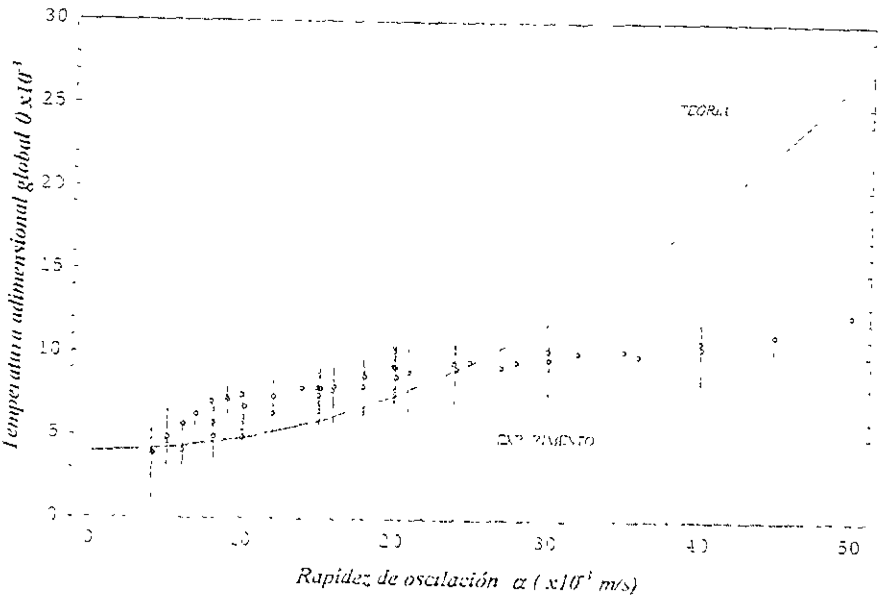


Fig 4 11 -Grafica de la temperatura adimensional global θ_b en funcion de la rapidez de oscilacion α, obtenida de acuerdo con el modelo de Oldroyd y en la cual se muestran los datos experimentales

resultados experimentales, sin embargo, conforme la rapidez de oscilación sobrepasa el valor antes mencionado, la curva teorica sobreestima las temperaturas obtenidas experimentalmente

4.2.2 Modelo Newtoniano Generalizado - Ecuación de Ostwald de Waele

Para analizar el comportamiento de la temperatura adimensional $\theta = (T_p - T_o) / T_o$ en funcion de la amplitud A y la frecuencia de oscilación ω mediante la ecuación de Oswald de Waele, utilizamos la ecuacion 2.39

$$T_p = T_o - \frac{\rho C_p a^2}{k}\left\{\left[\frac{1}{4}\left(1-\left(\frac{r}{a}\right)^2\right)(A_1 - A_2) + \frac{A_1}{\left(\frac{1}{n}-3\right)^2}\left(1-\left(\frac{r}{a}\right)^{\frac{1}{n}-3}\right)\right]\left(\frac{\Delta T}{\Delta Z}\right) - \frac{A_3 m}{k}\frac{a^{\frac{1}{n}+3}}{\left(\frac{1}{n}-3\right)^2}\left(1-\left(\frac{r}{a}\right)^{\frac{1}{n}-3}\right)\right\} \qquad (2.39)$$

donde las constantes A_1, A_2 y A_3 las expresamos en función del caudal Q, que es el parámetro que experimentalmente se controla y mantiene constante. De esta manera las constantes resultan

$$A_1 = \left(\frac{Q - \omega A a^2 e^{i\omega t}}{\pi}\right)\left(\frac{1-3n}{a^2(1+n)}\right)$$

$$A_2 = \omega A e^{i\omega t}$$

$$A_3 = \left(\frac{Q - \omega A a^2 e^{i\omega t}}{\frac{\pi a^3 n}{1-3n}}\right)^{n-1}\left(\frac{1}{a}\right)^{\frac{1}{n}-1}$$

En lo referente a las constantes m y n conocidas como parametro de consistencia y de potencia respectivamente, estas se determinan a partir de la viscosidad del fluido en funcion de la rapidez de corte. Para el analisis teórico-experimental de la disipacion viscosa en el flujo oscilante consideramos las propiedades características del PEBD reportadas por Tanner[48] a una temperatura de 160 °C. La viscosidad del polímero en funcion de la rapidez de corte ajustada a la ecuacion tipo Ley de Potencia

$$\eta(\dot{\gamma}) = m\dot{\gamma}^{n-1} \qquad (4.19)$$

resultando con los valores de m = 8262.86 N [illegible] n [illegible]

En la figura 4 12 se muestra la temperatura adimensional global θ_b del flujo a la salida de la boquilla en funcion de la frecuencia de oscilación ω para cuatro valores constantes de gradiente de temperatura axial $\Delta T/\Delta z$ (0 5, 0 75, 1 0 °C/m y 1 5 °C/m) Para cada gradiente de temperatura las curvas continuas representan la maxima amplitud de oscilacion de la boquilla ($A=5\times10^{-3}$m) y las curvas discontinuas corresponden a la mínima amplitud (1×10^{-3}m) La temperatura θ_b a bajas amplitudes de oscilacion tiene variaciones pequeñas con la frecuencia de oscilacion para todos los gradientes de temperatura considerados En el caso de la maxima amplitud de oscilacion la temperatura θ_b crece conforme aumenta la frecuencia de oscilación y el valor del gradiente de temperatura axial

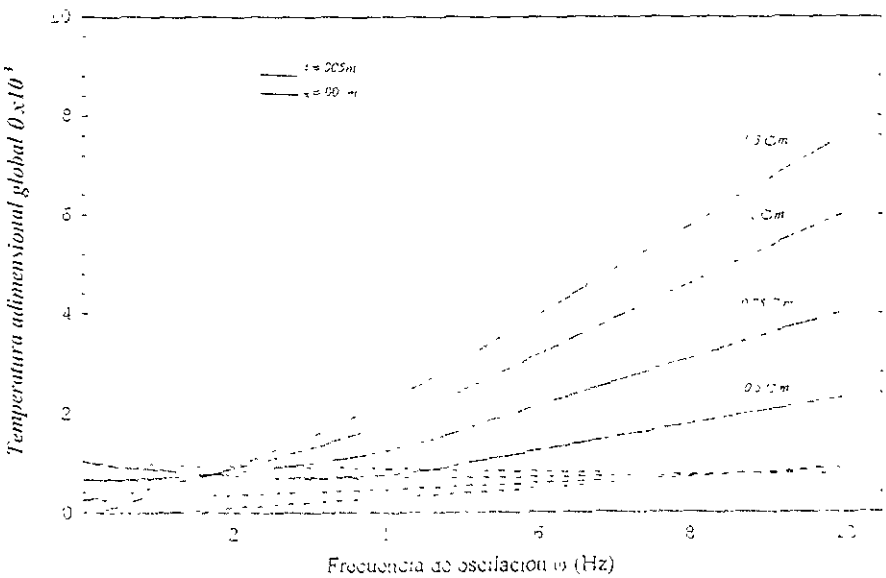
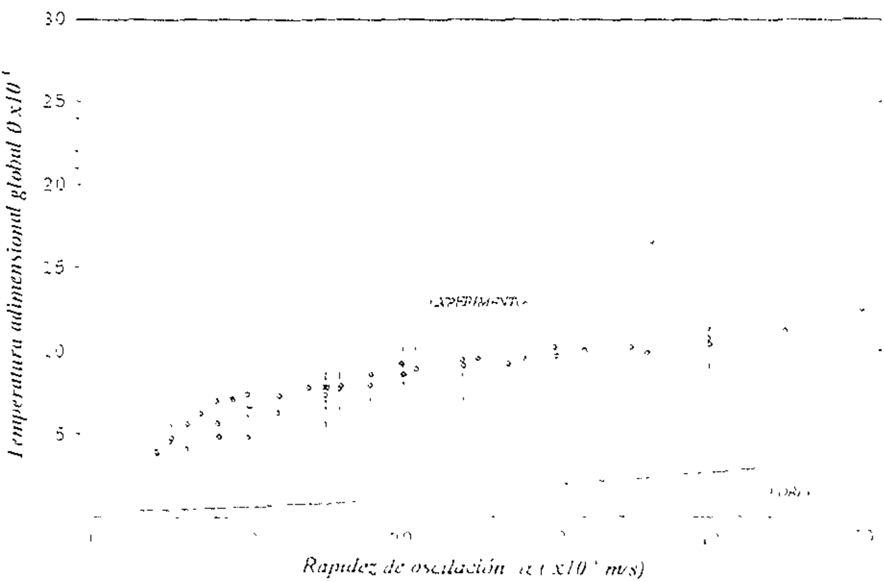


Fig 4 12 -Grafico de la temperatura adimensional global θ_b en funcion de la frecuencia de oscilacion ω para cuatro valores del gradiente de temperatura axial $\Delta T/\Delta z$ (0 5, 0 75, 1 0 y 1 5 °C/m) considerando en cada caso los valores extremos de la amplitud de oscilacion de la boquilla (linea continua-5×10^{-3}m y linea a trazos 1×10^{-3}m)

En la eleccion del valor apropiado para el gradiente de temperatura en la direccion axial ($\Delta T/\Delta z$) [illegible] los resultados [illegible] publicados por Bird [7], donde resuelve el problema de disipación viscosa en un flujo que satisface la ecuacion de Ostwald de Waele bajo condiciones de pared estática En estas condiciones podemos elegir de la figura 4 12, la curva que intercepta a la ordenada (θ) al origen en un valor correspondiente a la temperatura por disipacion viscosa reportada por Bird en condiciones de pared estática. En nuestro caso, para las condiciones de flujo ($Q=1.5\times10^{-8}$ m^3/s) y de fluido considerado (PEBD) obtenemos de acuerdo con Bird una variacion de temperatura por disipacion viscosa en condiciones estaticas de 1 2 °C, lo que corresponde en la figura 4 12 a un valor de $\theta=7.25\times10^{-4}$ y por lo tanto a la curva definida para un gradiente de temperatura axial de 0 75 °C/m

Utilizando la ecuación 2 39 con los valores para el flujo en la boquilla oscilante, las propiedades del PEBD y el gradiente de temperatura axial anteriormente determinado, obtenemos el comportamiento de la temperatura adimensional θ del flujo en funcion de la rapidez de oscilacion α Estos resultados son mostrados en las figura 4.13



De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que la temperatura adimensional global θ_b calculada con el modelo de Ostwald de Waele, en todos los casos resulta menor que la temperatura obtenida experimentalmente, sin embargo, el modelo predice de manera cualitativa el comportamiento de la disipación viscosa en el flujo viscoso, en función de la rapidez de oscilación α

CAPITULO V.

CONCLUSIONES

5.1.- CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACION

En términos generales, podemos concluir que el flujo de un fluido viscoelástico sometido a oscilaciones mediante una boquilla colocada a la salida de un extrusor presenta alteraciones con respecto al flujo en condiciones de boquilla estática en lo referente a la dinámica del flujo, las propiedades mecánicas del producto extrudido y en la transferencia de calor que se genera por disipación viscosa en el flujo

Respecto a la dinámica del flujo oscilante, los resultados experimentales obtenidos para las rapideces de oscilación constante, indican que el flujo másico de PEBD se incrementa con respecto al flujo másico en el caso estático. Esto confirma los resultados reportados por otros autores para oscilaciones de tipo longitudinal, transversal y helicoidal. Este comportamiento es explicado por la disminución de la viscosidad del fluido debido a la rapidez de corte en la vecindad de la pared oscilante, efecto que es más notorio en las oscilaciones de tipo helicoidal donde se generan los gradientes de velocidad más altos ocasionando una disminución de la viscosidad, acorde con los resultados obtenidos en la presente investigación.

El uso de las fibras de henequén como trazadores para la visualización del flujo oscilante confirma que los tipos de oscilación longitudinal y transversal inducen una orientación preferencial en el producto extrudido. Esto podría explica la alteración de las propiedades mecánicas del material extrudido al inducir una orientación en las cadenas poliméricas del fluido y de esta forma confirmar la suposición planteada por Mena et al. [39]. La alteración de las propiedades mecánicas por efecto de la boquilla oscilante fue a su vez afectada por las fibras de henequén utilizadas como trazadores. Se observó que debido a la pobre cohesión entre las fibras y la matriz del PEBD se formaron porosidades en la interfaz fibra-matriz. Debido a esta porosidad ocasionada posiblemente por un tratamiento inadecuado de las fibras y/o el PEBD, las propiedades mecánicas del producto extrudido resultaron más bajas.

Para el estudio teórico-experimental de la disipación viscosa por efecto de la oscilación de tipo longitudinal se obtuvo que la temperatura adimensional global θ_s depende de la magnitud de la rapidez de oscilación y de las propiedades viscoelásticas del fluido. La solución analítica obtenida con el modelo viscoelástico lineal para un fluido tipo Oldroyd, predice una disminución de la temperatura global θ_b cuando el tiempo de relajación es comparable al tiempo de retardamiento y un incremento en dicha temperatura cuando el tiempo de relajación tiende a ser mayor que el tiempo de retardamiento, lo que indica que mientras más elástico es el fluido, mayor es la disipacion viscosa en el flujo oscilante

La solución analítica obtenida con el modelo newtoniano generalizado utilizando una ecuación constitutiva tipo ley de potencia predice una disminución de la temperatura global θ_b a medida que el fluido disminuye su viscosidad por efecto de la rapidez de corte En otras palabras, la disipación viscosa disminuye si el fluido tiene un comportamiento más pseudoplástico En los modelos considerados, la dependencia de la temperatura global θ_b con la elasticidad y la viscosidad del fluido, se hace más relevante conforme aumentan las rapideces de oscilacion de la boquilla

El rediseño de la boquilla oscilante utilizada para determinar experimentalmente la disipación viscosa por efecto de la oscilación de tipo longitudinal, permitió un mejor control en la temperatura de pared y de la medición de la temperatura del flujo de PEBD en la seccion final de la boquilla Los resultados experimentales obtenidos para la temperatura global θ_b del flujo oscilante están cualitativamente de acuerdo con las predicciones teóricas de los modelos considerados

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos, el modelo de Oldroyd predice el comportamiento de la temperatura θ_b, cuando las rapideces de oscilacion α son bajas, lo cual se justifica en un modelo basado en una relación lineal entre el tensor de esfuerzos y la rapidez de deformacion válido para rapideces de deformacion pequeñas Por otra parte, el modelo ley de potencia muestra un comportamiento de la temperatura θ_b de forma muy similar con los datos experimentales, en cuanto a que presentan cualitativamente la misma tendencia en todo el rango de rapideces de oscilación.

5.2. - APORTACIONES DEL TRABAJO.

La investigación teórico-experimental realizada en flujos viscoelásticos oscilatorios permitió determinar la influencia de la viscosidad y la elasticidad en el comportamiento de la dinámica del flujo y de la disipación viscosa. Utilizando modelos reológicos sencillos obtuvimos una solución analítica del problema. Con dichos modelos validados experimentalmente, es posible predecir el incremento de la temperatura adimensional global θ_b por efecto de disipacion viscosa, otrora despreciada en procesos de extrusión. Experimentalmente se encuentra que el control de la temperatura de pared constante es insuficiente para el control de la temperatura global del proceso de extrusión, lo que genera problemas en la calidad del producto extrudido como se ha reportado en recientes investigaciones [32]

5.3. - ALCANCES Y LIMITACIONES

En lo general, podemos concluir que las propiedades elásticas y viscosas de un fluido consideradas a través de modelos sencillos, nos permiten predecir en determinadas condiciones de operación de la boquilla, la disipacion viscosa por efecto de la oscilación. A pesar de que esta disipación es relativamente pequeña respecto a la temperatura de operación del proceso (≈1-3%), esta es importante durante la extrusión de materiales poliméricos dado que se ha reportado que variaciones en la temperatura de este orden, ocasionan inestabilidades que resultan en distorsiones regulares e irregulares en el interior y la superficie del material extrudido. La naturaleza de estas inestabilidades termicas es un problema abierto pues estos efectos no se han podido explicar mediante consideraciones de tipo reológico, por lo que resulta necesario continuar con investigaciones de tipo teórico-experimental

5.4 - SUGERENCIAS PARA INVESTIGACIONES FUTURAS RELACIONADAS CON EL TEMA.

En lo que referente a la investigación teórica, es importante continuar la presente investigación considerando los tipos de oscilación longitudinal, transversal y helicoidal de la boquilla utilizando ecuaciones constitutivas más complejas para la determinación de la disipación viscosa. Para tal caso será necesario utilizar técnicas numéricas para obtener la solución del problema Como complemento de la investigación realizada en el presente trabajo de tesis y de la investigación propuesta, sugerimos hacer dichas investigaciones bajo la condición de flujo de calor constante en la pared de la boquilla oscilante y relajando la condición de un gradiente de temperatura axial constante

Para validar los resultados obtenidos en la investigación teórica es necesario, también, realizar los experimentos correspondientes. Finalmente, consideramos importante realizar investigación más a fondo en el area de materiales compuestos con fibras El tratamiento previo de las fibras podría asegurar la compatibilidad matriz-fibra y de esta forma mejorar las propiedades mecánicas del material aprovechando la orientacion inducida a las fibras por efecto de la boquilla oscilante

REFERENCIAS:

1 Adewale K.P and Leonov A.I., Modeling Spurt an Stress Oscillations in Flow of Molten Polymers, Rheol Acta, 36, 110, 1997

2 Aguilar M and Cruz C., Properties of Henequen Cellulosic Fibers, J Of Appl Polym Sci Vol 56, 1245, 1995

3 Astarita G., The Maximum Amplitude of Strain for the Validity of Linear Viscoelasticity, J Non-Newtonian Fluid Mech., 3, 281, 1978

4 Avalos R Francisco, Franco C Walfre y Toral S Pedro, Materiales Compuestos Obtenidos Mediante el Uso de Boquillas Oscilantes en el Proceso de Extrusión Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM México, 1997

5 Barnes H A., Hutton J F & Walters K., An Introduction to Rheology, Elsevier, 1989

6 Bilir S., Numerical Solution of Graetz Problem with Axial Conduction, Numerical Heat Transfer, Part A., 21, 493, 1992

7 Bird B., Armstrong, R C., & Hassager O., Dynamics of Polymeric Liquids, Vol 2, Wiley, 1987

8 Casulli J., Clermont J R, Von Ziegler A. and Mena B., The Oscillating Die A Usefull Concept in Polymer Extrusion, J Polym Eng Sci., 30, 1551-1556, 1990

9 Cazaurang-Martinez, M N., Herrera-Franco P J., Gonzales- Chi P I and Aguilar Vega M., Physical and Mechanical Properties of Henequen Fibers, J Appl Polym Sci., Vol 43, 749, 1991

10 Costello B A de L., Parallel Superposition Rheology of Polyethylene as a Function of Temperature, J Non-Newtonian Fluid Mech., 68, 303, 1997

11 Crochet A., Davies A R. and Walters K., Numerical Simulation of Non-Newtonian Flow, Elsevier Science Publishers B V, 1984

12 Dae-Young Lee, Sang-Jin Park and Sung Tack Ro, Heat Transfer by Oscilating Flow in a Circular Pipe With a Sinusoidal Wall Temperature Distribution, Int J Heat Mass Transfer, 38, 2529, 1997

13 Davidson, D L , Graessley W W , and Schowalter W R ,Velocity and Stress Fields of Polymeric Liquids Flowing in a Periodically Constricted Channel. Part I. Experimental Methods and Straight Channel Validations, J Non-Newtonian Fluid Mech , 49, 317, 1993

14 Ding Fan, Jeffrey G A , Bird B R., Kweon C B , Viscous Dissipation with Fluid Inertia in Oscillatory Shear Flow, J Non-Newtonian Fluid Mech , 86, 359, 1999

15 Dunwoody J , The Effects of Inertia and Finite Amplitude on Oscillatory Plane Shear Flow of K-BKZ fluids such as LDPE melts, J Non-Newtonian Fluid Mech., 65, 195 1996

16 Etemad S GH. And Mujumdar A.S., Effects of Variable Viscosity and Viscous Dissipation on Laminar Convection Heat Transfer of a Power Law Fluid in the Entrance Region of a Semi-Circular Fluid, Int. J Heat Mass Transfer, 38, 2225, 1995.

17 Franco W , Gutierrez J A , Mena B , Herrera V R and Marquez A , Oscillatory Die for Extrusion of Polymeric and Waste Materials-Application to Composite Materials Ussing Natural Fibers Twelfth International Annual Meeting, The Polymer Processing Society, Sorrento Italy, May 1996

18 Fridman M L , Peshkosky S L., and Vinogrado G.V , The Rheology of Thermoplastics Under Conditions of Spiral Flow and Vibrations on Extrusion, J Polym Eng Sci , 21, 755 - 766, 1981

19 Gerrit W M Peters, Frank P T Baaijens, Modelling of Non-Isothermal Viscoelastic Flows J Non-Newtonian Fluid Mech , 68, 205-224, 1997

20 Goublomme A and Crochet M J , J Non-Newtonian Fluid Mech , 47, 287, 1993

21 Graetz L, On the Thermal Conductivity of Liquids, Ann Phys Chem , 25, 357, 1885

22 Gruenwald Geza, Plastics. How Structure Determines Properties, Hanser Publishers, 1992

23 Guadarrama G Mario y Martínez L Isaías, Construccion e Instrumentacion de un Extrusor de Polímeros, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnologico de Zacatepec DGIT-SEP Mexico, 1998

24 Gutierrez F J Antonio, Regimenes de Flujos Oscilantes en Boquillas para Extrusion de Polimeros Tesis de Maestria, Facultad de Ingenieria UNAM Mexico 1997

25 Herrera V R. and Mena B , Extrusion of Composite Materials with Natural Fibers Using Oscillatory Dies XIIth International Congress on Rheology, Canadian Rhelogy Group. Quebec Canada. 1996

26 Herrera V R and Mena B , Extrusion of Composite Materials Fibers With Oscillatory Dies 2nd Pacific Rim Conference on Rheology. Melbourne. Australia, July 1997

27 Herrera V R and Mena I B , Newtonian and non Newtonian Oscilatory Flows, Revista Mexicana de Física. Publicación en proceso

28 Howell T G , Jeng D R De Witt K J , Momentum and Heat Transfer on a Continuous Moving Surface in a Power Law Fluid, Int J Heat Mass Transfer, 40, 1853, 1997

29 Isayev A I , Wong C M and Zeng X , Flow of Thermoplastics in an Annular Die Under Orthogonal Oscillations, J Non-Newtonian Fluid Mech , 34, 375, 1990

30 L Joseph, S Thomas and C Pavithran, Effects of Chemical Treatment on the tensile Properties of Short Sisal Fibre-Reinforced Polyethylene Composites Polymer Vol 37 No 23, 5139,1996

31 Kheilaf K And Lauriat G , A New Analytical Solution for Heat Transfer in the Entrance Region of Ducts, Hidrodynamically Developed Flows of Power-Law Fluids with Constant Wall Temperature, Int J Heat Mass Transfer, Vol 40, 14, 3443, 1997

32 Kolnaar J W H and Keller A A Singularyty in the Melt Flow of Polyethylene with Wider Implications for Polymer Melt Flow Rheology, Rheol Acta, 36, 110, 1997

33 Larson Ronald G Constitutive Equations for Polymer Melts and Solutions, Butterworths Serie, 1988

34 Leonov A I , On a Class of Constitutive Equations for Viscoelastic Liquids, J Non-Newtonian Fluid Mech , 25, 59, 1987

35 Lodge A.S , Elastic Liquids, Academic Press, 1964

36 Luo X L and Tanner R I , A Pseudo-Time Integral Method for Non-Isothermal Viscoelastic Flow and its Application to Extrusion Simulation, Rheol Acta, 26, 449, 1987

37 Manero O , and Mena B , An Interesting Effect in Non - Newtonian Flow in Ocillating Flow in Oscillating Pipes Rheol Acta, 16,573 , 1977

38 Manero O , Mena B , and Valenzuela R , Further Developments on Non - Newtonian Flow in Oscillating Pipes, Rheol Acta, 17, 693, 1978

39.Mena B , Manero O , and Binding D M , Complex Flow of Viscoelastic Fluids Through Oscillating Pipes Interesting Effects and Application J Non-Newtonian Fluid Mech , 5, 427-447, 1979

40 Moschandreou T and Zamir M , Heat Transfer in a Tube with Pulsating Flow and Constant Heat Flux, Int J Heat Mass Transfer, 40, 2461, 1997

41 Phan-Thien N , The Effects of Random Longitudinal Vibration on Pipe Flow of a Non-Newtonian Fluid, Rheol , Acta, 19, 539, 1980

42 Papanastasiou A C , Macosko C W , Scriven L E and Chen Z , AIChE J 33, 834, 1987

43 Papanastasiou A C , Scriven L E and Macosko C W , J Rheol Acta, 27,387, 1983

44 Scott A , Prost-Domasky and Bamin Khomami , A Note on Start-Up and Large Amplitude Oscillatory Shear Flow of Multimode Viscoelastic Fluid, Rheol Acta, 5,211, 1996

45 Taegeen Min, Hyoung Gwon Choi, Jung Yul Yoo and Haecheon Choi, Laminar Convective Heat Transfer of a Bingham Plastic in a Circular Pipe-Numerical Approach-Hydrodynamically Developing Flow and Simultaneosly Developing Flow, Int J Heat Mass Transfer, 40 , 3689-3701,1997

46 Tanner Roger I , Engineering Rheology, Clarendon Press, Oxford, 1988

47 Vlassopoulos, D , Schowalter W R , LDA Measurements of Steady Streaming Flows of Newtonian and Viscoelastic Fluids, Experiments in Fluids, 20, 21-28, 1995

48 Vlastosm G ,Lerche D , Koch B ,Samba O , Pohl M , The Effect of Parallel Combined Steady and Oscillatory Shear Flows on Blood and Polymer Solutions, Rheol Acta 36,100, 160-172, 1997

49 White, S A., and Baird D G , Flow Visualization and Birefringence Studies on Planar Entry Flow Behavior of Polymer Melts, J Non-Newtonian Fluid Mech , 29, 245, 1988

50 Wong C M , Chen C H , and Isayev A I , Flow of Thermoplastics in an Annular Die Under Parallel Oscillations, Polymer Engineering and Science, 30 , 1571-1584, 1990

51 Yin X And Bau H H , The Conjugate Graetz Problem with Axial Conduction J Heat Transfer 118, 482 1996

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD 100%

ESFUERZO MAXIMO (Mpa)

TIPO DE OSCILACION	*ORIENTACION DE PROBETAS*	*PROMEDIO*	*DESVIACION ESTANDAR*	*% DE VARIACION VS SIN OSCILACION*
SIN OSCILACION				
	0	11.58	0.39	
	45	11.64	0.20	
	90	11.47	0.23	
	135	11.75	0.29	
TRANSVERSAL				
	0	11.98	0.19	3
	45	11.87	0.20	2
	90	11.94	0.42	4
	135	11.88	0.08	1
LONGITUDINAL				
	0	11.57	0.28	0
	45	11.88	0.14	2
	90	11.72	0.26	2
	135	11.70	0.26	0
HELICOIDAL				
	0	11.93	0.18	3
	45	11.94	0.41	3
	90	12.04	0.18	5
	135	12.02	0.15	2

DEFORMACION AL ESFUERZO MAXIMO (%)

TIPO DE OSCILACION	*ORIENTACION DE PROBETAS*	*PROMEDIO*	*DESVIACION ESTANDAR*	*% DE VARIACION VS. SIN OSCILACION*
SIN OSCILACION				
	0	19.81	0.92	
	45	20.92	0.58	
	90	20.42	0.63	
	135	20.63	1.04	
TRANSVERSAL				
	0	20.59	0.7	4
	45	20.25	1.24	-3
	90	20.71	0.33	1
	135	20.64	1.27	0
LONGITUDINAL				
	0	20.24	1.11	2
	45	20.54	1.20	-2
	90	21.66	1.30	0
	135	21.14	0.50	2
HELICOIDAL				
	0	20.48	1.17	3
	45	20.77	0.68	-1
	90	19.18	0.14	-6
	135	19.94	0.80	-3

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD 92.5%-FIBRAS DE HENEQUEN 7.5%

ESFUERZO MAXIMO (Mpa)

TIPO DE OSCILACION	*ORIENTACION DE PROBETAS*	*PROMEDIO*	*DESVIACION ESTANDAR*	*% DE VARIACION VS SIN OSCILACION*
SIN OSCILACION				
	0	5.34	0.32	
	45	4.21	0.40	
	90	3.76	0.26	
	135	4.12	0.38	
TRANSVERSAL				
	0	3.41	0.24	-36
	45	3.74	0.10	-11
	90	3.03	0.09	-19
	135	3.24	0.09	-21
LONGITUDINAL				
	0	4.05	0.20	-24
	45	3.22	0.10	-24
	90	2.66	0.38	-29
	135	2.94	0.34	-29
HELICOIDAL				
	0	3.54	0.22	-34
	45	3.17	0.20	-25
	90	3.15	0.23	-16
	135	3.33	0.33	-19

DEFORMACION AL ESFUERZO MAXIMO (%)

TIPO DE OSCILACION	*ORIENTACION DE PROBETAS*	*PROMEDIO*	*DESVIACION ESTANDAR*	*% DE VARIACION VS SIN OSCILACION*
SIN OSCILACION				
	0	10.57	1.53	
	45	9.72	1.56	
	90	8.71	0.87	
	135	8.26	1.15	
TRANSVERSAL				
	0	13.97	2.55	32
	45	12.23	1.38	26
	90	10.47	0.91	20
	135	12.64	1.48	53
LONGITUDINAL				
	0	13.12	2.59	24
	45	13.37	1.23	18
	90	10.01	1.35	15
	135	11.79	1.49	43
HELICOIDAL				
	0	14.10	2.02	33
	45	11.26	0.97	16
	90	11.35	1.41	30
	135	11.02	0.42	33

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD 85%-FIBRAS DE HENEQUEN 15%

ESFUERZO MAXIMO (Mpa)

TIPO DE OSCILACION	*ORIENTACION DE PROBETAS*	*PROMEDIO*	*DESVIACION ESTANDAR*	*% DE VARIACION VS SIN OSCILACION*
SIN OSCILACION				
	0	7.55	0.22	
	45	6.68	0.24	
	90	6.27	0.33	
	135	6.53	0.24	
TRANSVERSAL				
	0	7.15	0.70	-5
	45	6.98	0.12	5
	90	6.29	0.12	0
	135	7.22	0.15	11
LONGITUDINAL				
	0	6.90	0.62	-9
	45	7.00	0.49	5
	90	6.13	0.16	-2
	135	7.06	0.20	8
HELICOIDAL				
	0	7.70	0.73	2
	45	6.62	0.43	-1
	90	6.94	0.25	11
	135	7.50	0.32	15

DEFORMACION AL ESFUERZO MAXIMO (%)

TIPO DE OSCILACION	*ORIENTACION DE PROBETAS*	*PROMEDIO*	*DESVIACION ESTANDAR*	*% DE VARIACION VS SIN OSCILACION*
SIN OSCILACION				
	0	10.04	1.01	
	45	9.72	1.03	
	90	8.28	0.80	
	135	8.75	0.45	
TRANSVERSAL				
	0	8.62	1.74	-14
	45	8.57	1.50	-12
	90	8.56	1.05	3
	135	9.70	0.49	11
LONGITUDINAL				
	0	9.71	1.36	-3
	45	9.48	1.10	-3
	90	8.20	1.79	-1
	135	8.37	0.79	-4
HELICOIDAL				
	0	9.95	1.07	-1
	45	9.05	0.37	-7
	90	10.16	0.83	23
	135	9.50	1.57	9

ANEXO II

PROGRAMA PARA EL CALCULO Y LA ELABORACION DE GRAFICAS. (UTILIZANDO EL PAQUETE DE "MATHEMATICA")

PROGRAMA PARA EL MODELO LEY DE POTENCIA DONDE SE OBTIENE:

*Perfil de temperaturas.

*Temperatura adimensional global en función de las rapideces de oscilación para diferentes valores del gradiente de temperatura axial y del parámetro de potencia.

*Número de Nusselt en función de las rapideces de oscilación para diferentes valores del gradiente de temperatura axial y del parámetro de potencia.

PROPIEDADES:FLUIDO,FLUJO Y BOQUILLA OSCILANTE

```
rho=920.0 "Densidad"
cp=2000.0 "Calor específico a presión constante"
k=0.25     "Conductividad térmica"
a=0.001    "Amplitud de la oscilación"
w=1        "Frecuencia de la oscilación Hz"
Q=0.00000015 "Flujo másico"
R=0.0032   "Radio interior de la boquilla"
V=9.32     "Velocidad máxima del flujo Poiseuille (mm/s)"
b=0.47      "Indice de potencia en el modelo Ley de Potencia"
m=8202.9   "Número de consistencia en el modelo Ley de Potencia
DT=1.0     "Gradiente de temperatura axial (C/m)
r=x/R      "Posición radial adimensional"
z=0.6366   "Factor de tiempo en un período de oscilación"
To=160.0   "Temperatura de pared"
```

CONSTANTES DEFINIDAS EN LA ECUACION 2.39

```
A1=((Q+w*a*(R^2)*z)*(1+3b))/((1+b)*3.1416
*R^2)
A2=w*a*z
A3=((((Q+w*a*(R^2)*z))/
((3.1416*R^3)/((1/b)+3)))^(b+1))*(1/R)^((1/b)+1)
```

CALCULO DE LA TEMPERATURA DE ACUERDO CON LA ECUACION 2.39
(PERFIL DE TEMPERATURAS).

```
F1=(rho*cp*R^2)/k
F2=Re[F1*(1/4)*(((x)^2)-1)*(A1+A2)*DT]
F3=Re[F1*A1*(1/((1/b)+3)^2)*((x)^((1/b)+3)-1)*DT]
F4=Re[(m*A3/(k*((1/b)+3)^2))*(R^((1/b)+3))*(1-(x)^
((1/b)+3))]
F5=F2+F3+F4+To
F6=A1*(1-(x)^((1/b)+1))-A2
F7=F6*F5*R*x
```

```
F8=NIntegrate[F7,{x,0,1}]
F9=F6*R*x
F10=NIntegrate[F9,{x,0,1}]
```

CALCULO DE LA TEMPERATURA GLOBAL, PARA OBTENER LA TEMPERATURA ADIMENSIONAL GLOBAL Y EL NUMERO DE NUSSELT.

```
B1=rho*cp
B2=A1+A2
B3=(2*A1)/((1/b)+3)
B4=(2*m*A3/((1/b)+3))R^((1/b)+1)
B5=(R^2)/(k((F8/F10)-To))
B6=(B5*((B1*(B2+B3))*DT-B4))
Tb1=((F8/F10)-To)*1000/To
Nu1=Abs[B6]
```

CALCULO DE LA TEMPERATURA ADIMENSIONAL GLOBAL Y DEL NUMERO DE NUSSELT EN FUNCION DE LAS RAPIDECES DE OSCILACION.

```
w=2-50

A1=((Q+w*a*(R^2)*z)*(1+3b))/((1+b)*3.1416
*R^2)
A2=w*a*z
A3=((((Q+w*a*(R^2)*z))/
((3.1416*R^3)/((1/b)+3)))^(b+1))*(1/R)^((1/b)+1)
F1=(rho*cp*R^2)/k
F2=Re[F1*(1/4)*(((x)^2)-1)*(A1+A2)*DT]
F3=Re[F1*A1*(1/((1/b)+3)^2)*((x)^((1/b)+3)-1)*DT]
F4=Re[(m*A3/(k*((1/b)+3)^2))*(R^((1/b)+3))*(1-(x)^
((1/b)+3))]
F5=F2+F3+F4+To
F6=A1*(1-(x)^((1/b)+1))+A2
F7=F6*F5*R*x
F8=NIntegrate[F7,{x,0,1}]
F9=F6*R*x
F10=NIntegrate[F9,{x,0,1}]
B1=rho*cp
B2=A1+A2
B3=(2*A1)/((1/b)+3)
B4=(2*m*A3/((1/b)+3))R^((1/b)+1)
B5=(R^2)/(k((F8/F10)-To))
B6=(B5*((B1*(B2+B3))*DT-B4))
Tb2=((F8/F10)-To)*1000/To
Nu2=Abs[B6]
```

```
g2=ListPlot[{{1/V,Nu1},{2/V,Nu2},{3/V,Nu3},{5/V,Nu4},{7/V,Nu5}
{9/V,Nu6},{11/V,Nu7},{13/V,Nu8},{15/V,Nu9},{16/V,N1},{17/V,N2}
{18/V,N3},{20/V,N4},{25/V,N5},{30/V,N6},{35/V,N7},{40/V,N8},
{45/V,N9},{50/V,S}},PlotJoined->True]
g5=ListPlot[{{1/V,Tb1},{2/V,Tb2},{3/V,Tb3},{5/V,Tb4},{7/V,Tb5}
{9/V,Tb6},{11/V,Tb7},{13/V,Tb8},{15/V,Tb9},{16/V,T1},{17/V,T2}
{18/V,T3},{20/V,T4},{25/V,T5},{30/V,T6},{35/V,T7},{40/V,T8},
{45/V,T9},{50/V,T}},PlotJoined->True]Text1=Text[FontForm["n=0.
{"times-Italic",7}],{10,50}]
Text2=Text[FontForm["n=1.0",
{"times-Italic",7}],{10,15}]
Text3=Text[FontForm["n=1.5",
{"times-Italic",7}],{2,15}]
Text4=Text[FontForm["n=0.5",
{"times-Italic",7}],{10,4}]
Text5=Text[FontForm["n=1.0",
{"times-Italic",7}],{10,18}]
Text6=Text[FontForm["n=1.5",
{"times-Italic",7}],{1.5,20}]
g11=Show[g1,g2,g3,Graphics[{Text1,Text2,Text3}],PlotRange->
{{0,11},{9,75}},PlotLabel->"dT/dZ=1.0",FrameLabel->{v,Nu},
Frame->True]
g22=Show[g4,g5,g6,Graphics[{Text4,Text5,Text6}],PlotRange->
{{0,11},{0,30}},PlotLabel->"dT/dZ=1.0",FrameLabel->{v,Tad},Fra
True]
```

Programa de MATHEMATICA utilizado para el cálculo del perfil de temperatura con el modelo de Oldroyd.


```
n=1
a=0.001
b1=0
b2=0
dz=1.5
num=5.0
To=160.0
vm=0.00413
k=0.5
rho=920.0
cp=2000.0
r=0.0032
to=.6366
nu=30701.8

T1=(1/k)*rho*cp*vm*(3/8)*(r^2)*dz
J=(((-rho*I*n)/nu)^0.5)*(((1+I*n*(b1))/
(1-I*n*(b2)))^0.5)*r
Jo=BesselJ[0,J]
T20=(1/k)*rho*cp*((a*n*to)/(Jo))
T21=Sum[(((-1)^i)/(Factorial[i]*Factorial[i]))*
((J*y)/2)^(2*i),{i,0,num}]
T22=(T21)*y
T23=Integrate[T22,y]
T24=(1/y)*(T23)
T25=Integrate[T24,y]
T2=(T20)*(T25)*dz
T30=(nu/k)*((1+I*n*(b1))/(1+I*n*(b2)))*
(a*n*to)^2/(Jo)^2
T32=D[(T21),y]
T33=(T32)^2
T34=(T33)*y
T35=Integrate[T34,y]
T36=(1/y)*(T35)
T37=Integrate[T36,y]
T3=(T30)*(T37)
T40=(nu/k)*((1+I*n*(b1))/(1+I*n*(b2)))*((8*a*n*to))*
(vm/r^2)/(Jo)




T43=(T32)*(y)^2
T44=Integrate[(T43),y]
T45=(1/y)*(T44)
T46=Integrate[(T45),y]
```

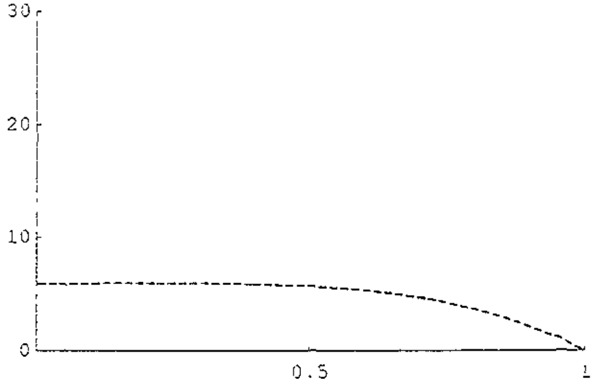
```
T4=(T40)*(T46)
T51=vm^2
T5=Re[(nu/k)*((1+I*n*(b1))/(1+I*n*(b2)))*(T51)]
T6=Re[To-T1-T2+T3-T4+T5]
T7=T6/.y->r

S11=(1/k)*rho*cp*vm*(((0.5)*((y)^2))-(1/(8*r^2))*
(y)^4)
S13=(S11)*dz
S1=S13
J=(((-rho*I*n)/nu)^0.5)*(((1+I*n*(b1))/
(1+I*n*(b2)))^0.5)*r
Jo=BesselJ[0,J]
S20=(1/k)*rho*cp*((a*n*to)/(Jo))
S21=Sum[(((-1)^i)/(Factorial[i]*Factorial[i]))*
((J*y)/2)^(2*i),{i,0,num}]
S22=(S21)*y
S23=Integrate[S22,y]
S24=(1/(y))*(S23)
S25=Integrate[S24,y]
S2=Re[(S20)*(S25)*dz]
S30=(nu/k)*((1+I*n*(b1))/(1+I*n*(b2)))*
(a*n*to)^2/(Jo)^2
S32=D[S21,y]
S33=(S32)^2
S34=(S33)*y
S35=Integrate[S34,y]
S36=(1/y)*(S35)
S37=Integrate[S36,y]
S3=Re[(S30)*(S37)]
S40=(nu/k)*((1+I*n*(b1))/(1+I*n*(b2)))*((8*a*n*to))*
(vm/r^2)/(Jo)




S43=(S32)*(y)^2
S44=Integrate[S43,y]
S45=(1/y)*(S44)
S46=Integrate[S45,y]
S4=Re[(S40)*(S46)]
S51=(vm^2/(r^4))*y^4
S5=Re[(nu/k)*((1+I*n*(b1))/(1+I*n*(b2)))*(S51)]
T=S1+S2-S3+S4-S5+T7
TN0=2*vm*((1-(y)^2)+((a*n*(T21))/(Jo)))*T*y
TN1=NIntegrate[TN0,{y,0,r}]
TD0=2*vm*((1-(y)^2)+((a*n*(T21))/(Jo)))*y
TD1=NIntegrate[TD0,{y,0,r},
```

```
T11=Re[(TN1)/(TD1)]
J1=Plot[1000*(T-To)/To,{y,0,r},PlotStyle->{Dashing
[{.01,.01}]},PlotRange->{{0,r},{0,30}},
FrameLabel->{"w(Hz)","(T-To)/Tox10"},Ticks->{{{0,0},{.0016,.5}
{.0032,1}},{{0,0},{10,10},{20,20},{30,30},{40,40},
{50,50}}}]
T8=(T-To)/To/.y->0
T12=(T11-To)/To
```




```
-Graphics-
0.0059426
0.0040927
```