

ANALISIS, DISEÑO Y CONSTRUCCION DE
DISPOSITIVO DE EXTRUSION PARA LA
FABRICACION DE POLIDUCTO USANDO
MATERIAL RECICLADO

TESIS

004222

QUE PARA OBTENER EL GRADO
ACADEMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA
EN LA ESPECIALIDAD DE**

DISEÑO MECANICO

PRESENTA

ING. LUIS DEL LLANO VIZCAYA

QUERETARO, QRO. OCTUBRE 2000.



CONTENIDO

RECONOCIMIENTOS

NOMENCLATURA

INTRODUCCION

1

PROYECTO DE INVESTIGACION

CAPITULO 1 PROPIEDADES DE FLUJO

1.1 Dado típico de extrusión	13
1.2 Introducción a las propiedades de flujo	15
1.2.1 Fluidos no-Newtonianos	17
1.2.2 Fluidos dependientes del tiempo	19
1.2.3 Materiales viscoelásticos	20

CAPITULO 2 FLUJO A TRAVES DE CANALES DE SECCION TRANSVERSAL SIMPLE

2.1 Suposiciones para análisis de flujo	23
2.2 Fluidos Newtonianos	23
2.2.1 Flujo a través de un canal de sección circular	23
2.2.2 Flujo a través de un canal de sección anular	28
2.3 Fluidos no-Newtonianos	33
2.3.1 Flujo a través de un canal de sección circular	33

CAPITULO 3 ESTUDIO DEL FLUJO EN UN EXTRUSOR

3.1 Flujo en un extrusor	37
3.1.1 Análisis de flujo en un extrusor para fluidos newtonianos bajo condiciones isotérmicas	40
3.1.1.1 Flujo en la zona de alimentación	48
3.1.2 Análisis gráfico comparativo de flujo para fluidos newtonianos bajo condiciones isotérmicas	51
3.2 Cálculo de flujo volumétrico a través de un sistema extrusor/dado	53
3.3 Análisis de consumo de potencia en un extrusor	57

CAPITULO 4 RECICLADO DE PLASTICOS Y CARACTERIZACION REOLOGICA

4.1 Reciclado de plástico	63
4.2 Poliolefinas	64
4.3 Polietileno	65
4.4 Materiales más comunes en el moldeo	66
4.4.1 Condiciones aproximadas del moldeo para los principales termoplásticos	66
4.4.1.1 Polietileno de baja densidad (LPE)	66
4.4.1.2 Polietileno de alta densidad (HPE)	67
4.5 Modelo reológico del plástico	68
4.5.1 Introducción	68
4.5.2 Corrección de Bagley	70
4.5.3 Corrección de Rabinowitsch	71
4.6 Modelos reológicos	71
4.6.1 Caso no newtoniano-isotérmico	72
4.7 Metodología para la obtención de curvas reológicas	73
4.7.1 Índice del comportamiento del fluido, n	77

CAPITULO 5 MANUFACTURA DEL DISPOSITIVO DE EXTRUSION

5.1 Recubrimientos	78
5.1.1 Cromo	78
5.1.2 Niquel	77
5.2 Dureza superficial	79
5.3 Tratamientos Térmicos	82
5.3.1 Endurecimiento por flama	82
5.3.2 Endurecimiento por inducción	82
5.3.3 Nitrado	82
5.3.4 Carburizado	83
5.3.5 Tratamientos especiales	83
5.4 Tolerancias en la manufactura de los dados	85
5.5 Diseño del dado	86
5.6 Calentadores	86

**CAPITULO 6 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN
EN ESTADO PERMANENTE.**

6.1 MEF	88
6.2 Solución de ecuación diferencial	89
6.3 Sistemas axisimétricos	92
6.4 Solución de problemas continuos	94
6.4.1 Discretización del continuo	94
6.4.2 Funciones de forma	94
6.4.3 Ensamble y solución	95
6.5 Modelación ANSYS	96

6.6 Determinación de la distribución de temperatura en una camisa de salida del dado extrusor	100
6.6.1 Procedimiento de solución	101
6.6.2 Análisis	104
6.7 Determinación de distribución de temperatura en una camisa de salida del dado en estado permanente, por método de solución de elemento finito (MEF).	108
CONCLUSIONES	111
COMENTARIOS	112
APENDICE A1	113
APENDICE A2	115
ANEXO A	118
ANEXO B	131
BIBLIOGRAFIA	139



HAGO PATENTE MI AGRADECIMIENTO Y RECONOCIMIENTO A LA
EMPRESA

“PLASTICOS PARA EMBALAJE S.A. de C.V.”

POR LA CONFIANZA BRINDADA PARA APOYAR A PARTICIPANTES EN
LA REALIZACION DE ESTE PROYECTO DE TESIS.

ADEMAS MI AGRADECIMIENTO Y RECONOCIMIENTO AL ***ING. ANGEL
RAMIREZ VAZQUEZ*** DIRECTOR GENERAL DEL ***CENTRO DE
INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL***, POR EL APOYO EN
TIEMPO Y PERSONAL HUMANO, QUE ME FUE PROPORCIONADO
DURANTE EL DESARROLLO DE ESTE PROYECTO DE TESIS.

A mi madre

Josefina Vizcaya Vargas

**Por su cariño, apoyo y comprensión
Demostrados en cada etapa de mi formación.**

A mi padre

Luis del llano Olvera

**Por su incomparable guía y enseñanza
Quien me hubiera dicho “hazlo hijo”**

A mis hermanos

Octavio, Alicia y Adrián

Por la fuerza y la alegría que me transmiten

A mi excelente compañera , novia de mi vida

Srita. María E. López Jiménez

Por su ayuda, comprensión y amor incondicional

A los Doctores

*Dr. Armando Gallegos Muñoz, Dr. Carlos Rubio González y M. Adrian
Méndez Prieto, M. Alfredo Manzo*

**Gracias a su valiosa ayuda y conocimientos fue posible la realización y
culminación de este proyecto.**

Toda investigación llevada a cabo para desarrollar tecnología propia con el fin de crear equipo y maquinaria para nuestro propio progreso, es una tarea lenta y con un sin número de dificultades, por tal razón quiero hacer patente mi gratitud a todas aquellas personas que me ayudaron en la realización de este trabajo, por mencionar algunas tenemos:

Los ingenieros **J. Luis Sanchez Gaytan**, por una incomparable amistad desinteresada **Alfredo Manzo Preciado**, por sus sugerencias y recomendaciones en los momentos críticos del desarrollo de esta tesis.

Además quiero agradecer en particular a los Doctores:

Dr. **Armando Gallegos Muñoz**, **Director Académico del Proyecto**, por su gran carisma y paciencia que a él caracteriza en el desarrollo de esta tesis así mismo al Dr. **Carlos Rubio González** asesor en **Elemento Finito** y en el **Software de ANSYS** al Maestro **Adrián Méndez Prieto** asesor en **materiales poliméricos** por su gran hospitalidad demostrada en las Instalaciones y cursos que imparte el Centro de investigación en Química Aplicada en la ciudad de Saltillo, Coahuila Mex. y al Dr. **Guillermo Rodríguez Vilomara** Director del Posgrado Interinstitucional de Ciencia y Tecnología.

Al Maestro en Ingeniería **Alfredo Manzo Preciado** asesor en **Diseño de Manufactura**, y al Lic. **Carlos Urbiola Avendaño** Tutor en **Planta** por parte de la empresa **Plásticos para Embalaje S.A. de C.V.**

Todos nuestros logros presentes y futuros se los debemos a las personas que brindaron esfuerzo para que yo adquiriera los conocimientos necesarios para mi formación, es por esto que deseo hacer ni mayor reconocimiento a nuestros profesores, parientes y amigos pero principalmente a quienes debo lo que soy y seré.

Las manos
(fragmento)

**Todo hombre se vale de las manos
y lo que nos rodea lo hicieron ellas:
las obras de arte lucen siempre bellas
y son la admiración de los humanos.**

**Obra de mano es la del cirujano:
gracias a ella la salud perdura.
exige precisión, fuerza y dulzura,
porque trabaja sobre el ser humano.**

**Manos humildes son las del artesano:
poco se reconoce su actuación,
aunque todo lo que hacen esas manos
logran que sobreviva una Nación.**

DR. ERNESTO MARISCAL A.

NOMENCLATURA

A	área
B1	relación geométrica
B2	relación geométrica
C1	constante de integración
C2	constante de integración
D	diámetro del barril
e	espesor de la hélice del husillo
E	longitud (axial) entre dos hélices del husillo
F	fuerza
G	módulo como función del tiempo
Go	módulo inicial
h	coeficiente convectivo de transferencia de calor
H	profundidad del canal del husillo
dx	diferencial de x
K	constante de la ley de potencias
L	longitud del husillo
n	índice de la ley de potencias
N	velocidad de rotación del husillo
P	presión
Cp	calor específico a presión constante
dP	diferencial de presión
Q	flujo volumétrico
QD	flujo de arrastre
QP	flujo de presión
QL	flujo de pérdida
r	radio
dr	diferencial de radio

R	radio denominado como condición de frontera
Re	número de Reynolds
t	tiempo
U_z	velocidad máxima del fluido en dirección del canal
V	velocidad
V_z	velocidad en dirección z
w	ancho del canal del husillo
x	coordenada cartesiana
Z	longitud del canal del husillo

SIMBOLOS GRIEGOS

α	relación entre flujo de arrastre & velocidad de rotación
ΔP	gradiente de presión a lo largo del barril
η	viscosidad del flujo
η_a	viscosidad del flujo aparente
δ	separación entre la hélice y el barril
θ	ángulo entre la hélice y la dirección perpendicular al husillo
λ	relación entre radios
ρ	densidad
σ	esfuerzo de corte
γ	velocidad de corte o rapidez de corte

INTRODUCCION

El proceso de extrusión de plásticos es solo uno de los varios procesos de fabricación que se llevan a cabo en la industria de los polímeros. Este proceso ha tenido tal relevancia que tanto la industria Química como la Mecánica han enfocado su atención para su mejor conocimiento.

La palabra “extruir” esta formada por las palabras latinas “ex” (fuera) y “trudere”(forzar o empujar). Esto describe el proceso por sí mismo: “formado por paso forzado a través de un orificio o abertura, que se conoce como dado extrusor”.

En general, se tienen dos tipos básicos de extrusores:

1. Continuos
2. Discontinuos

Los extrusores continuos son capaces de desarrollar un flujo permanente y continuo, utilizando un miembro rotatorio para el transporte de material .

Los extrusores discontinuos operan en forma cíclica y cuentan con un miembro reciprocante para desarrollar la acción del extruido. Estos últimos, son utilizados ampliamente en el moldeo por inyección y moldeo por soplado.

Los materiales pueden ser extruidos en estado líquido (generalmente de alta viscosidad) o en estado sólido. Entre los tipos básicos de extruido en estado sólido se encuentra la extrusión de aceros, estaño, plomo y polímeros, para la fabricación de perfiles tubulares. Si el material se alimenta al extrusor en estado sólido y en su transporte hasta el dado, se funde, entonces se desarrolla un proceso de extrusión plastificante. En este caso, el extrusor tiene una función adicional, fundir el material, en comparación de la función básica de extrusión. Este estudio comprende la extrusión plastificante para un proceso continuo.

Actualmente los materiales plásticos son utilizados, en gran parte, en aplicaciones donde materiales clásicos como el acero, eran insustituibles. La facilidad del proceso de fabricación, el relativo bajo costo del proceso y la reciclabilidad son los aspectos más notables que definen la creciente importancia del procesamiento de polímeros.

En particular, la industria del procesamiento de los polímeros concerniente con la conversión de productos útiles, ha tenido en las décadas pasadas un crecimiento notable [1]. Sin embargo, en nuestro país el desarrollo tecnológico de la maquinaria de extrusión es prácticamente nulo.

En el presente trabajo se desarrolla un dado para extrusión, el cual tiene como objetivo incrementar la producción de poliducto, disminuir costos de fabricación y operación. Esto se logra mediante el incremento de la eficiencia de producción y calidad. Para el diseño del nuevo dado de extrusión se lleva a cabo un análisis térmico-mecánico, de sus cámaras de calentamiento.

El proyecto consiste en la implementación de un dado con doble salida de extrusión de plástico, a un extrusor Marca OMC de fabricación italiana, el cual es utilizado para peletización de polietileno con un gasto de 70 kg cada 80 minutos, ver figura a; dicho dispositivo de extrusión (dado) es requerido para el conformado de poliducto con diámetros de 12.7 a 101mm ($\frac{1}{2}$ -4"), así como para diferentes geometrías tales como perfiles, tubos y películas.

El hecho de que el dispositivo de extrusión (dado) sea de doble salida, es debido al mejor manejo de flujo másico del extrusor para la fabricación de poliducto de diámetros de $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm), tomando en cuenta la adaptabilidad de dispositivos periféricos para la fabricación de perfiles.

Este trabajo de tesis contemplará el dispositivo de extrusión (dado) para la fabricación de poliducto únicamente, dejando para trabajos posteriores la adaptación de dispositivos periféricos para las diferentes geometrías de perfiles y películas.



Figura a. Extrusor Marca OMC

El resultado de la investigación de este dado será extruir simultáneamente dos productos diferentes a partir de un extrusor, ya que permitirá aprovechar el flujo másico del extrusor que opera al 40% de eficiencia, de esta manera incrementarlo al 90%, donde el balance entre las variables del proceso contribuyen para obtener un producto terminado con calidad y exactitud en su sección transversal utilizando materia prima reciclada.

En la tabla 1 se presentan las diferentes marcas extranjeras que se manejan en México, particularmente, en la extrusión de plásticos.

Tabla 1. Maquinaria extranjera utilizada en extrusión de plásticos.

<u>Maquinaria</u>	<u>País de origen</u>
Nokia-Maillefer	Finlandia
Royle	USA
Davis Standard	USA

Genca	USA
Killion	USA
Canterbury	USA
Rosendhal	Austria
Swisscab	Suiza
Cross Mc. Faire	Alemania
D' angel	Italia

De lo anterior, se desprende la necesidad del desarrollo tecnológico de la maquinaria de extrusión y sus componentes, (ver figura 1.1 en capítulo 1).

El proceso de extrusión para la fabricación de poliducto, sigue siendo empírico. Es decir, el personal de proceso cuenta con normas o especificaciones en la fabricación de poliducto, que han sido elaboradas a través de los años y las aplican para obtener cierta calidad de producto. Sin embargo, el proceso de mejorar alguna característica tecnológica, por ejemplo; apariencia del producto, se realiza por el método de prueba y error, sin conocer lo que sucede dentro del dado del extrusor y todo se deja a la “intuición” del operador con la manipulación no-sistemática de las condiciones de operación, que trae consigo desperdicio de material, retrasos en los tiempos de planta y el consiguiente aumento de costos de la producción. Por lo anterior, desde hace tiempo, diferentes investigadores se ocupan de la simulación teórica del proceso de extrusión. La tarea por describir matemáticamente el proceso, simularlo y obtener resultados confiables es difícil, debido principalmente a la compleja geometría del dado del extrusor, y la necesidad de una reología real del termoplástico utilizado, además de una instrumentación adecuada en la recámara y cabeza de la extrusora.

El conocimiento fundamental del proceso interno del extrusor puede alcanzarse por medio de la generación de los modelos matemáticos que permitan la simulación de este proceso y así, poder encontrar las relaciones entre los parámetros operativos, del material y de la geometría del dado, para obtener por ejemplo: mayor calidad del producto o una mezcla homogénea (temperatura, velocidad) a la salida. Así mismo, un modelo matemático

permitirá definir los valores de los parámetros que definen el diseño de la maquinaria y sus componentes.

Uno de los parámetros operativos más importantes en el proceso de extrusión es la presión. Esta define directamente la interacción en el gasto de la maquinaria y por lo tanto la calidad del producto [2]. El conocimiento del perfil de presión en la máquina es básico en los cálculos de diseño en el tornillo, la presión máxima en la recámara y en la rigidez del mismo tornillo. El desarrollo del perfil de presión a lo largo de la recámara de un extrusor es el primer aspecto a considerar antes de pensar en algún cálculo básico del diseño de los componentes.

La zona de entrega del tornillo o de transporte del material fundido, (ver figura 1.2, capítulo 1; para la descripción de la geometría de las componentes del extrusor en esta zona) se conoce también como zona de bombeo, debido a que el polímero fundido será transportado hacia el dado contra una considerable carga de presión. Esta sección es particularmente importante puesto que en ella se definen características de presión y temperatura del polímero al entrar a la cabeza. Así, por ejemplo, una presión baja al llegar a la cabeza puede producir una distribución irregular de flujo en la misma. Por otro lado, una temperatura alta en esta zona de entrega del tornillo tiene sus deficiencias desde el punto de vista de la simulación real; pero por otro lado, cada trabajo presentado por investigadores nos acerca más a la realidad y cada vez se tiene un mayor conocimiento del proceso de extrusión.

Las investigaciones publicadas sobre el proceso de extrusión de tornillo simple para la zona de entrega han tenido un fuerte desarrollo desde 1989 hasta 1996, como lo muestran los trabajos de J.T. Lindt[3], M.V. Karwe[4], G.A. Camphell [5], M.A. Spalding [6], T.A. Plumley [7], T. Sastrohartono [8], Y. Li [9] e Y. Jaluria[10]. Los trabajos [3] y [9] desarrollan un modelo de solución analítica para la obtención de los campos de velocidad. Sin embargo, no llevan a cabo una validez experimental y utilizan la simplificación del canal rectangular, es decir, no consideran la geometría (helicoidal) de la zona. M. Spalding [6], presenta un modelo tridimensional de la sección de la entrega por medio de elementos

finitos y considera el caso no-isotérmico – no-newtoniano. En la validación experimental de su modelo obtiene una diferencia mínima de 4.2% para el perfil de presión a lo largo de la zona de entrega. Este desarrollo se lleva a cabo para un caso particular de la geometría del tornillo y no presenta la interacción entre los parámetros de operación, geométricos y del material. T.A. Plumley [7], realiza una continuación del trabajo de M.A. Spalding [6], modificando la profundidad del canal en la dirección axial; aunque se obtienen mejores resultados en cuanto a la homogeneización térmica, mezclado y transferencia de calor en el termoplástico, se inducen altas fluctuaciones de presión lo que genera grandes discrepancias (hasta del 100%) en la comparación de los resultados numéricos y experimentales. En el trabajo de T. Sastrohartono [8], el modelo matemático se simplifica considerablemente por la conceptualización del canal del tornillo desarrollado y plantea, además, la necesidad de utilizar un esquema de simulación por elemento finito.

M.V. Karwe [4], estudia el transporte térmico dentro del canal rectangular del tornillo simple desde el punto de vista numérico para fluidos no-newtonianos. Estos resultados son obtenidos usando técnicas de diferencias finitas. Concluye que el flujo es gobernado principalmente por el parámetro principal de rapidez de flujo, q_v . Se encuentra que el campo de temperatura está fuertemente afectado por los parámetros adimensionales G (No. de Griffith) y P_e (No. de Péclet). También demuestra que los cambios correspondientes en los campos de velocidad son pequeños. Esta última conclusión es importante, puesto que puede definir la poca influencia de las variaciones de temperatura (caso no-isotérmico) en los campos de velocidad. Y. Jaluria [10], lleva a cabo un desarrollo analítico de la transferencia de calor y masa en la extrusión del tornillo para fluidos no newtonianos; obtiene que la viscosidad y otras propiedades del fluido están fuertemente influenciadas por la temperatura y por la transferencia de masa. Encuentra, además que los mecanismos de transferencia de calor y masa son de crucial importancia en este proceso, ya que la calidad del producto es una función muy fuerte de la historia térmica y de corte del material. Aunque, particularmente, esta publicación muestra resultados importantes en el desarrollo de los campos de temperatura y del tiempo de residencia del material, el análisis de la transferencia de calor y masa en la sección de entrega del tornillo, quedan fuera del alcance de este trabajo.

De la revisión de estas investigaciones publicadas se puede concluir que ninguna de ellas desarrolla en forma global los aspectos más importantes de la simulación de flujo de la zona de entrega, tales como: modelar la geometría real, analizar la interacción entre los parámetros operativos, geométricos y del material. De esta manera, en el presente trabajo de tesis se presentará una caracterización reológica del termoplástico de trabajo y modelar la sección de la cabeza y dado para una aplicación específica, como la fabricación de poliducto.

Puede concluirse que en la zona de entrega del extrusor se definen las características generales del plástico como son : apariencia, homogeneidad y propiedades mecánicas, las que influyen directamente al proceso de producción. De aquí, la importancia del conocimiento de esta zona que será precisamente la sección que dará pauta a este trabajo, mostrando condiciones de frontera para el posterior diseño del dado.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

La revisión de las investigaciones publicadas para la zona de entrega del extrusor permitió el establecimiento del “estado del arte” de la simulación del proceso de extrusión plastificante de tornillo simple. En esta década los estudios están enfocados en la zona de entrega, éstos tienen el objetivo de desarrollar los campos de presión, velocidad y temperatura así como la influencia de éstos; Por ejemplo, el flujo volumétrico. En general se puede mencionar que estas investigaciones consideran el caso no newtoniano, no isotérmico como la condición más semejante al proceso real de extrusión.

Se cuenta con importantes trabajos de desarrollo analítico [3], [9] que son particularmente útiles en extrusores con una relación $H/D_b \ll 1$, es decir desprecian la curvatura del tornillo y realizan la simplificación del tornillo desarrollado (canal rectangular). Otros trabajos, [11] y [4], realizan la misma simplificación aunque el método de solución es numérico (diferencias finitas). El trabajo de G. Milano [11] recomienda el análisis de las líneas de recirculación en la zona de entrega. Este aspecto es muy importante para la identificación de las zonas de degradación del material que influyen directamente en su apariencia y de aquí, en su calidad.

Los trabajos [6],[7],[8] y [10] utilizan el Método de elemento finito (MEF), como herramienta en la solución numérica de sus modelos, realizando a la vez su validación experimental. (MEF se describe en el capítulo 6). Particularmente, M.A. Spalding [6], realiza la investigación que más se asemeja al proceso real de extrusión. Analiza un modelo tridimensional de elemento finito (solo modela las últimas tres espiras de la zona de entrega) para el caso no- newtoniano- no –isotermico. El principal objetivo de su trabajo fue el desarrollo del perfil de presión para diferentes condiciones de operación (estableció tres velocidades de rotación del tornillo) y llevar a cabo la validación experimental. En esta validación se obtiene una diferencia máxima del 4.2% para el perfil de presión axial en la zona de entrega. Sin embargo, la comparación del modelo numérico se lleva a cabo con una extrusora comercial donde se cuenta con un tipo de restricción a la salida (cabeza o dado de extrusión) por lo que la comparación no se realiza para las mismas condiciones del modelo

de elemento finito (sin restricción a salida). Las simulaciones realizadas son particulares de una geometría fija del tornillo y no considera el acoplamiento de algún elemento (por ejemplo, una cabeza para el proceso de soplado) al final de la última espira del modelo de elemento finito.

Es importante mencionar que este proyecto de investigación fue definido una vez que el autor estuvo en una estancia industrial haciendo estudios de posgrado (durante dos años desde mediados de 1998) en planta Plásticos para Embalajes S.A. de C.V. localizada en Querétaro Mex. Esta estancia tenía como, objetivo de lograr un conocimiento fundamental del proceso de extrusión de tornillo simple para la fabricación de poliducto y de realizar la metodología de diseño de algunos herramientas utilizados en el proceso como son los dados y guías de extrusión. Lo anterior permitió la observación del proceso directamente de las máquinas de la empresa mencionada. Esta experiencia lograda, permitió en gran parte, el establecimiento de los alcances de este proyecto. Particularmente, la hipótesis presentada en la consideración de sólo analizar el caso no-newtoniano- isotérmico esta fuertemente basada en la experiencia práctica del autor. Las características de temperatura del material al salir del tornillo deben ser homogéneas. Lo anterior sólo se logra una vez que las condiciones de temperatura en la zona de entrega son estables, es decir, la diferencia entre la temperatura asignada y la temperatura del termoplástico tiende a ser cero. Precisamente sobre esta condición isotérmica se controla la temperatura en la zona de entrega y el proceso de producción no se inicia sin alcanzarla. Se debe mencionar que la condición no-isotérmica no newtoniana se dejará para un trabajo posterior, el cual se podría simular en una computadora (por medio de modelo de elemento finito) y llevar a cabo su validación experimental.

De lo anterior, se puede definir este proyecto de investigación de la siguiente manera: Desarrollar el diseño de un dado para la zona de entrega de un extrusor plastificador experimental de tornillo simple. El modelo deberá representar en lo más posible, la geometría real del dado. Además ya que se especifica una aplicación bien definida del proceso en la fabricación del poliducto, al modelo del dado se acoplará la malla de

elemento finito correspondiente a la cabeza para la fabricación de poliducto. Esta cabeza está formada por la boquilla y la sección de la guía y dado (figura b).

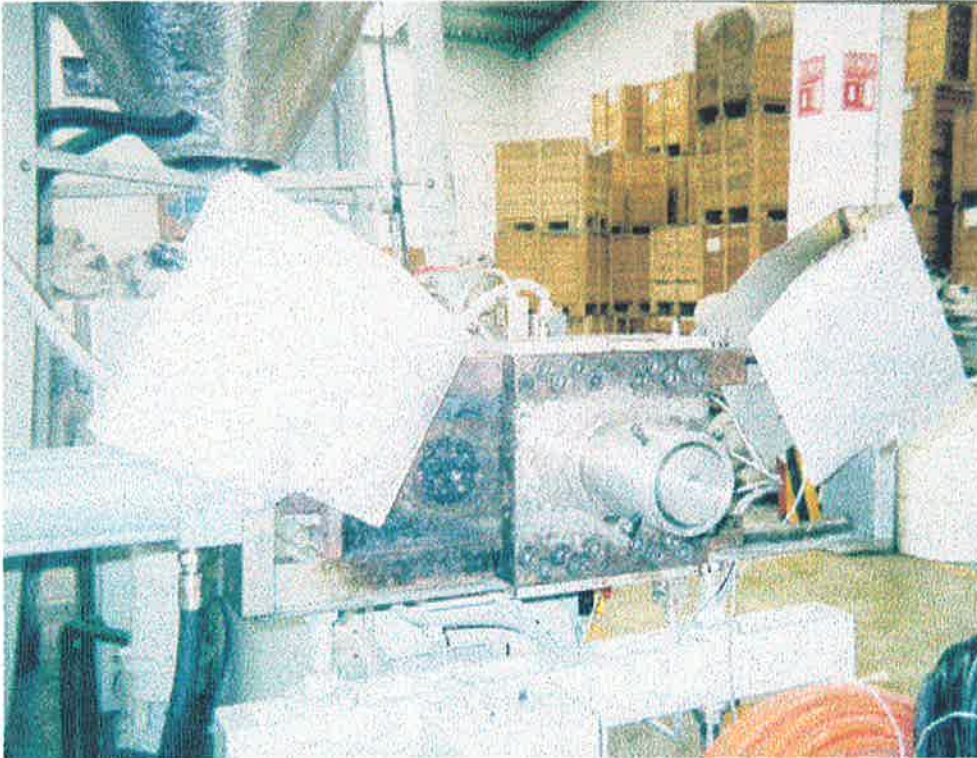


Figura b. Dado para fabricación de poliducto

Se analizará la interacción entre los parámetros operativos (velocidad de extruido de termoplástico), geométricos y del material plástico (viscosidad) que afectan directamente al perfil de presión y a la calidad del producto extruido. La validación del modelo numérico y experimental para el perfil de presión axial se realizará para el caso newtoniano-isotérmico que representa, desde el punto de vista práctico, la simulación más real del proceso.

La metodología que se llevará a cabo es la siguiente:

- 1.- Llevar a cabo una revisión de los modelos de presión existentes, atendiendo básicamente los métodos de solución y condiciones de frontera.

- 2.- Identificar la geometría del extrusor de laboratorio del Centro de investigación en Química Aplicada, sus componentes, así como la determinación del polímero de trabajo y sus propiedades físicas.
- 3.- Definir las condiciones de frontera (velocidad, presión y temperatura) del modelo que corresponda en lo mejor posible, a las características reales del proceso de extrusión para la fabricación de poliducto. La determinación de condiciones de frontera se logrará en un proceso progresivo, a la vez que se vaya conociendo el comportamiento del fluido.
- 4.- Generar el modelo axisimétrico 2D de elemento finito en la sección de entrega y cabeza del extrusor. La modelación se llevará a cabo en el paquete comercial ANSYS [12].
- 5.- Llevar a cabo las simulaciones por computadora para el caso isotérmico atendiendo las relaciones con los parámetros operativos de la reología del tornillo y cabeza.
- 6.- La validación experimental se realizará por medio de la comparación con los resultados numéricos del modelo de simulación por elementos finitos. Sólo se validarán los resultados para un tornillo ya que es el único que maneja (para el termoplástico PE) el extrusor experimental de laboratorio.

Los requerimientos y necesidades que se plantearon en el proyecto de diseño del dado extrusor son las siguientes:

- ◆ Minimizar el tiempo para uniformizar la temperatura.
- ◆ Minimizar desperdicio de material al comienzo de la operación, después de uniformizar la temperatura de trabajo.
- ◆ Conservación de temperatura en el dado del extrusor.
- ◆ Plastificar la materia prima reciclada sin variación de temperatura.
- ◆ Elevación del trabajo del extrusor al 90% de eficiencia.

- ◆ Extruir distintos diámetros de poliducto.
- ◆ Deberá tener la capacidad de adaptación de dispositivos secundarios para fabricación de perfiles.
- ◆ Calidad aceptable del producto final.
- ◆ Operar al menos 16 hrs. continuas diariamente.
- ◆ Facilidad para el mantenimiento y limpieza.
- ◆ Cumplir con normas internacionales referentes al ruido.
- ◆ Cumplir con las normas internacionales para extrusión de poliducto.

CAPITULO 1 PROPIEDADES DE FLUJO

En este capítulo se presenta brevemente, un diagrama de un dado típico para tubería y el proceso para la fabricación de poliducto; además, una introducción a las propiedades de flujo, con el hecho de lograr un mejor entendimiento, para la caracterización de un fluido.

1.1 DADO TIPICO DE EXTRUSION

A continuación se muestra un dado típico para extrusión de tubería (figura 1.1) con sus componentes principales:

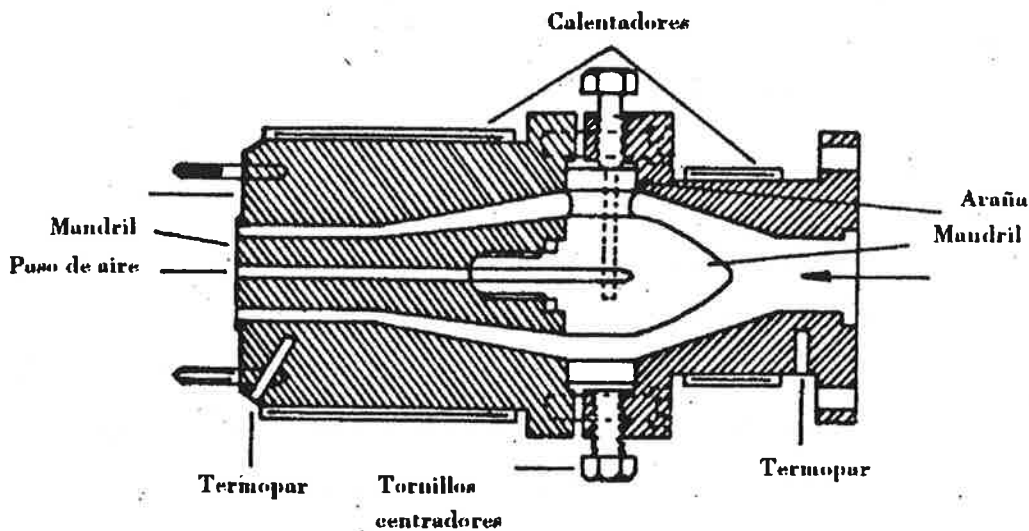


Figura 1.1. Dado típico para extrusión de tubería

La figura 1.2, muestra una disposición típica para extrusión de tubería:

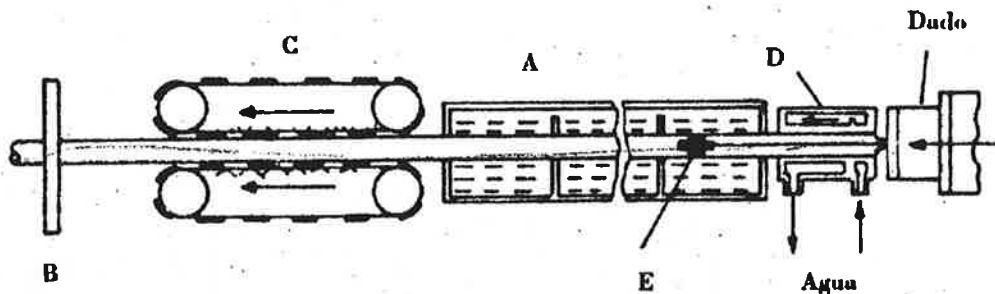


Figura 1.2. Disposición típica para extrusión de tubería.

donde:

- A) Tanque de agua de enfriamiento
- B) Sierra para cortar tramos de tubería
- C) Caterpillar o equipo de jalado.
- D) Dado transformador o *sizing die*
- E) Tapón flotante.

La manera más común de fijar el diámetro externo de la tubería es por medio de un *sizing die*; éste es un cilindro hueco, enfriado por agua, cuyo diámetro interno es igual al diámetro externo de la tubería, y va colocado inmediatamente después del dado. En este punto la tubería se infla con presión negativa en la recámara D) hasta el tamaño del *sizing die*.

El tanque de agua se utiliza para enfriar y solidificar la tubería. El equipo de jalado es, por lo general, un *Caterpillar* con dos bandas (arriba y abajo) que ejerce una ligera presión sobre la tubería. Cuando se trata de tuberías de diámetro grande, un *Caterpillar* con dos bandas puede causar distorsiones en la tubería y no proporcionar un jalado uniforme; entonces se puede utilizar un equipo con cuatro bandas: arriba, abajo y en ambos lados.

La figura 1.3 muestra el diagrama de un extrusor con la implementación del dado y sus partes constitutivas.

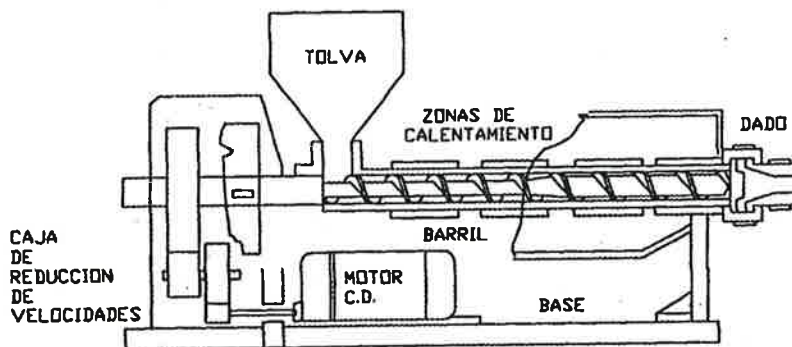


Figura 1.3. Esquema de una máquina extrusora de plástico.

1.2 Introducción a las propiedades de flujo

Se consideran dos placas paralelas, separadas entre sí por una distancia x , entre las cuales se encuentra un fluido de viscosidad " η ", como se ilustra en la figura 1.4.

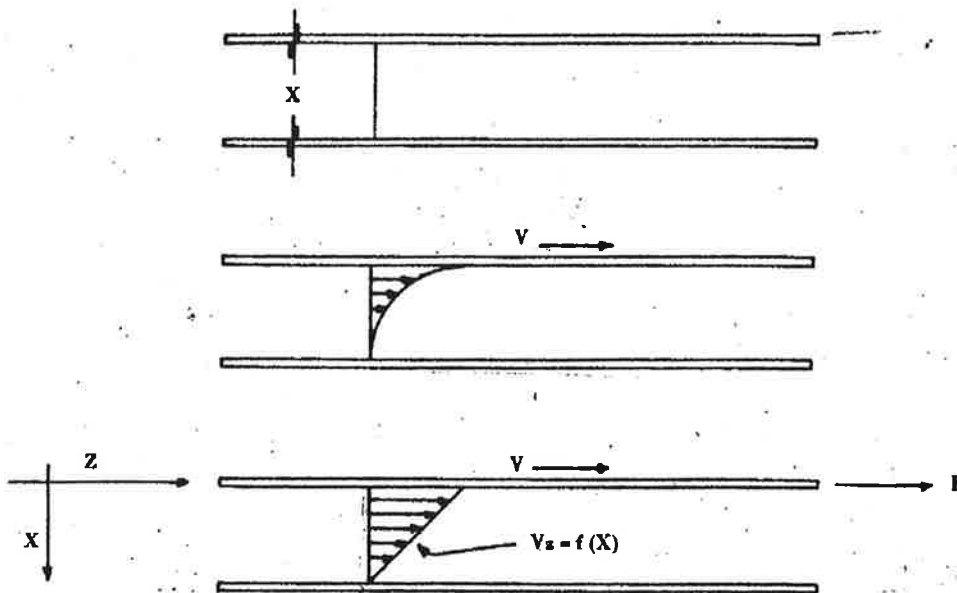


Figura 1.4 Flujo entre placas paralelas

El sistema se encuentra inicialmente en reposo. Al tiempo ($t=0$), la lámina superior se pone en movimiento en dirección Z a una velocidad constante V , debido a la aplicación de una fuerza F . A medida que transcurre el tiempo el fluido cobra movimiento y finalmente se alcanza el perfil de velocidades en estado permanente (parte inferior),[13].

En estado permanente es preciso aplicar una fuerza constante F para conservar el movimiento de la lámina superior a la velocidad V . La fuerza F y la velocidad V están relacionadas por la siguiente expresión:

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{V}{X} \quad (1.1)$$

donde A representa el área de la lámina en contacto con el fluido de viscosidad η . La relación fuerza/área (F/A) se denomina esfuerzo de corte (σ), y en este caso es un esfuerzo

que se propaga en dirección X debido a un movimiento en dirección Z (σ_{xz}). El cambio de velocidades que presenta el fluido en dirección X se representa como dV_z/dx , donde V_z es la velocidad del fluido en la dirección de Z. Así la ecuación 1.1 queda:

$$\sigma_{xz} = \eta \frac{dV_z}{dx} \quad (1.2)$$

Además, se tiene que:

$$\frac{\Delta V^+}{\Delta X} = \frac{\Delta L / \Delta t}{\Delta X} = \frac{\Delta L / \Delta x^{++}}{\Delta t} = \frac{\gamma}{\Delta t} = \dot{\gamma} \quad (1.3)$$

γ = velocidad de corte

Sustituyendo esta relación en la ecuación 1.2, resulta:

$$\sigma_z = \eta \dot{\gamma} \quad (1.4)$$

La ecuación 1.4 indica que el esfuerzo de corte es proporcional a la velocidad de deformación, y la constante de proporcionalidad se conoce como coeficiente de viscosidad, o simplemente viscosidad. La velocidad de deformación se conoce también como gradiente de velocidades o como velocidad de corte. Esta relación se conoce como Ley de Newton de la viscosidad, y a los fluidos que cumplen con ella se les denominan fluidos newtonianos.

NOTA: un cambio de velocidad ΔV es un cambio en distancia ΔL dividido por un cambio en tiempo Δt . $^{++}$: la $\Delta L / \Delta X$ representa en este caso la deformación de corte.

Ésta, dividida por el tiempo, representa la velocidad de deformación.

La viscosidad de los fluidos newtonianos es una constante independiente del tiempo y de los esfuerzos de corte involucrados, y depende solamente de la temperatura.

1.2.1 FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

Los materiales plásticos no exhiben el comportamiento simple de un fluido newtoniano. El comportamiento de estos fluidos no-newtonianos puede ser clasificado en tres categorías diferentes:

- Fluidos independientes del tiempo. Son fluidos cuya viscosidad es independiente del tiempo, pero depende de la velocidad de corte y de la temperatura.
- Fluidos dependientes del tiempo. Son fluidos cuya viscosidad depende del tiempo y, además, de la velocidad de corte y de la temperatura.
- Materiales viscoelásticos. Son fluidos no-newtonianos que muestran un comportamiento predominantemente viscoso, pero que exhiben un comportamiento elástico de manera parcial.

En este caso, existe un gran número de modelos matemáticos (ecuaciones) que buscan describir el comportamiento de estos materiales, es decir, pronosticar la relación entre "esfuerzo de corte y velocidad de corte". De estos modelos el más utilizado es la ecuación de la Ley de la Potencia, también conocida como ecuación de Ostwald de Waele [13].

$$\sigma = K \left[\frac{dV_z}{dr} \right]^n = K \dot{\gamma}^n \quad (1.5)$$

donde:

σ = esfuerzo de corte

$\dot{\gamma}$ = velocidad de corte

K = constante de la Ley de la Potencia

n = índice de la Ley de la Potencia

Por definición, para fluidos no-newtonianos la relación " $\sigma/\dot{\gamma}$ " se denomina viscosidad aparente (η_a). Entonces, la ecuación 1.5 queda así:

$$\eta_a = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1.6)$$

En la figura 1.2 se muestra la variación de la viscosidad con la velocidad de corte para los tres casos que a continuación se mencionan:

1. Cuando $n = 1$, la Ley de la Potencia se transforma en la Ley de Newton de la viscosidad donde $K' = \eta$. Así, se tendrá un fluido newtoniano donde la viscosidad permanece constante con respecto a la velocidad de corte.
2. Cuando $n < 1$, se tendrá un fluido no-newtoniano de tipo pseudoplástico, o simplemente pseudoplástico, en el cual la viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de corte.
3. Cuando $n > 1$, se tendrá un fluido no-newtoniano de tipo dilatante, o simplemente dilatante, en el cual la viscosidad aumenta al incrementar la velocidad de corte.

Por lo tanto al graficar la Ley de la Potencia (ecuación 1.5) en forma logarítmica, se obtiene:

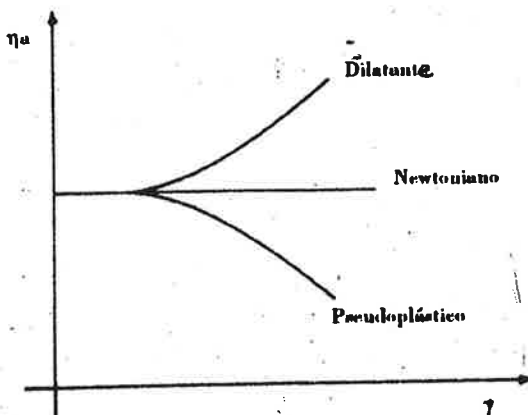


Figura 1.5 Gráfica de la ley de potencia

Esto significa que al graficar $\log \sigma$ vs. $\log \dot{\gamma}'$ (figura 1.6) se obtiene una línea recta con pendiente igual a n y con intersección en el eje de las ordenadas igual a $\log K'$.

$$\log \sigma = n \log \dot{\gamma}', + \log K' \quad (1.7)$$

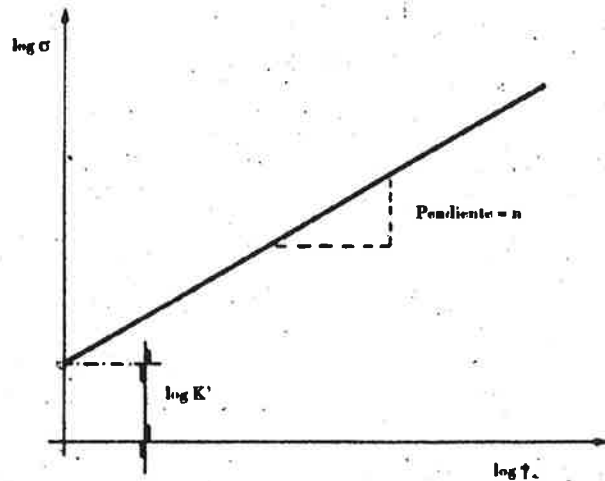


Figura 1.6 Gráfica de la ley de potencia en logaritmos

Experimentalmente se ha encontrado que la mayoría de los plásticos fundidos se comportan razonablemente como fluidos pseudoplásticos, y se dice razonablemente porque esto es válido solamente sobre un corto intervalo de $\log \dot{\gamma}$; cuando el intervalo es mayor se obtienen curvas con pendientes decrecientes, como se muestra en la figura 1.7.

1.2.2 FLUIDOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO

Esta clase define aquellos fluidos cuya viscosidad cambia con el tiempo durante la constante aplicación de un esfuerzo o una deformación. En el caso de fluidos tixotrópicos, la viscosidad disminuye con el tiempo durante la aplicación constante de un esfuerzo o deformación, mientras que en el caso de fluidos reopécticos la viscosidad aumenta con el tiempo durante la aplicación constante de un esfuerzo o una deformación.

1.2.3 MATERIALES VISCOELASTICOS

Son considerados como una subclase de los fluidos dependientes del tiempo. Estos materiales presentan un comportamiento intermedio entre un sólido elástico y un líquido viscoso. El comportamiento esfuerzo/deformación de un sólido elástico está definido por la ley de Hooke de la Elasticidad (figura 1.7)

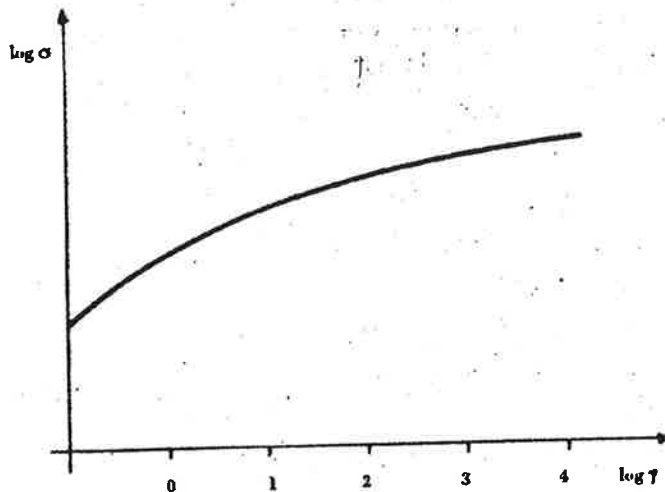


Figura 1.7 Gráfica esfuerzo/deformación

$$\text{Esfuerzo} = - \text{Módulo} \times \text{Deformación} \quad (1.8)$$

El comportamiento esfuerzo/deformación de un líquido viscoso está definido por la Ley de Newton de la viscosidad:

$$\text{Esfuerzo} = \text{Viscosidad} \times \text{Velocidad de deformación} \quad (1.9)$$

El modelo más simple que describe el comportamiento viscoelástico es el de Maxwell. Mecánicamente se representa como un resorte (que simboliza un sólido hookeano) conectado en serie a un amortiguador de pistón (que representa un fluido newtoniano)(figura 1.8)

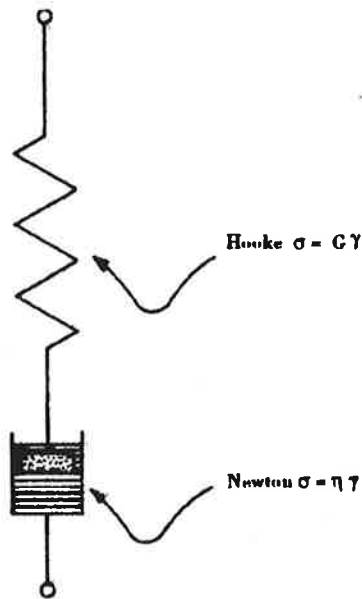


Figura 1.8 El comportamiento viscoelástico de maxwell

La ecuación que relaciona la disminución (el módulo con el tiempo) está dada por:

$$G = G_0 e^{-t/\theta} \quad (1.10)$$

donde:

G módulo como función del tiempo

G_0 módulo inicial

t tiempo

θ tiempo de relajación, definido por viscosidad/modulo (η/G)

Esta última ecuación predice la disminución del módulo a medida que pasa el tiempo en que el material está sometido a una deformación constante, tal como se observa en la figura 1.9.

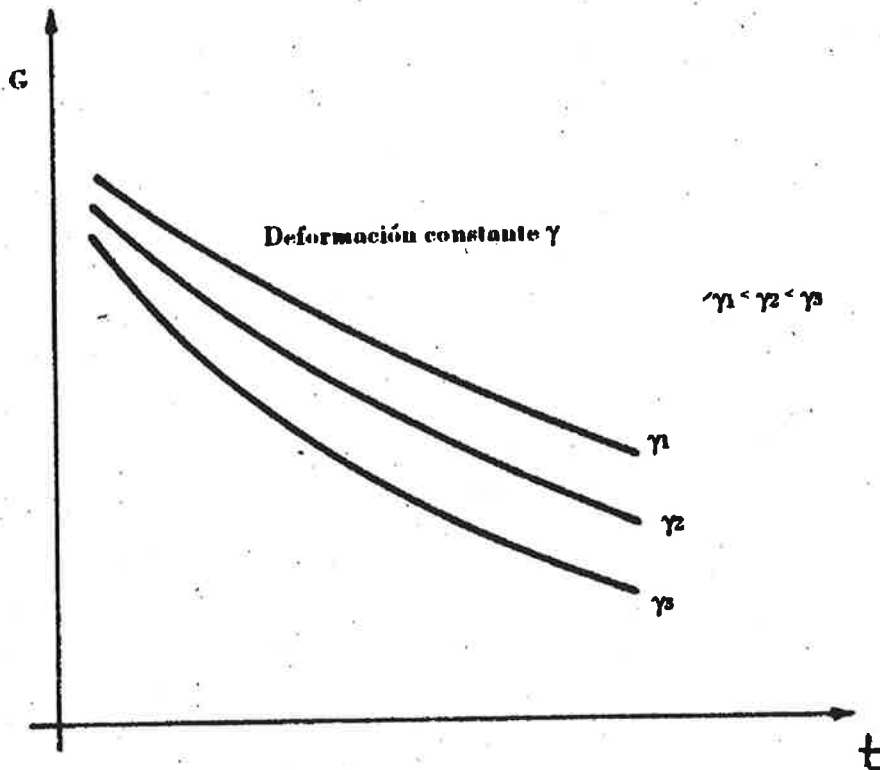


Figura 1.9 Comparación del Módulo G respecto del tiempo

En este capítulo se ha hecho una introducción a las propiedades de flujo, demostrando el comportamiento de un polímero por medio de la gráfica de la ley de potencia; con respecto a las variables esfuerzo-deformación definiéndolo como fluido seudoplástico.

En el capítulo siguiente se llevará a cabo el análisis de un fluido a través de canales de sección transversal simple (circular y anular), haciendo las suposiciones correspondientes para el caso de análisis de flujo newtoniano y no-newtoniano.

CAPITULO 2 FLUJO A TRAVES DE CANALES DE SECCION TRANSVERSAL SIMPLE

En el capítulo anterior se hace referencia a las propiedades de flujo, determinando el flujo de un polímero como pseudoplástico; en este capítulo se hace referencia al paso del flujo por un canal circular y anular, ya que son las geometrías por la cual es transportado el polímero para la fabricación del poliducto.

2.1 SUPOSICIONES PARA ANALISIS DE FLUJO

Para derivar las siguientes relaciones cuantitativas se establecen primero algunas suposiciones:

- La velocidad del fluido es igual a cero en la pared del canal.
- El fluido es independiente del tiempo.
- El patrón de flujo es constante a todo lo largo del canal.
- El flujo es isotérmico.
- En el caso de plásticos fundidos, se supone que son fluidos incompresibles

2.2 FLUIDOS NEWTONIANOS [14]

En este tema se considera el flujo newtoniano a través de un canal sección circular y anular y posteriormente, como fluido de la ley de potencia, para la determinación de las relaciones existentes, para velocidad de corte y esfuerzo de corte.

2.2.1 FLUJO A TRAVES DE UN CANAL DE SECCION CIRCULAR (figura 2. 1).

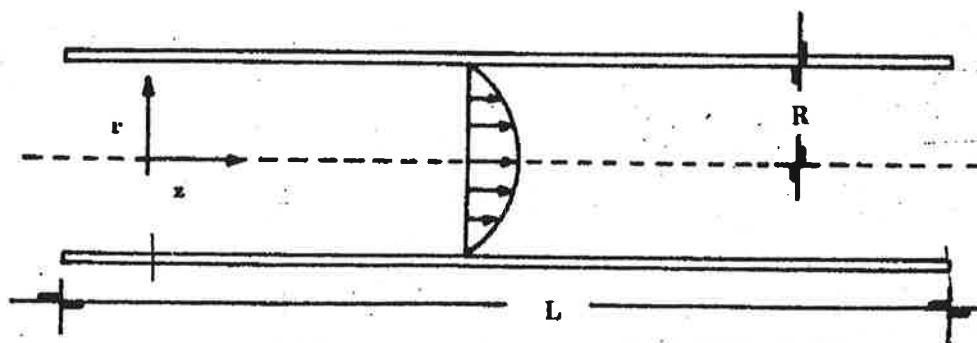


Figura 2.1 Flujo a través de un canal de sección circular

Luego de un balance de momentum (Apéndice A1, ecuación C), y considerando que:

$$V_z \text{ es diferente de cero}$$

$$V_r = V_\theta = 0$$

y que se tiene estado estable, es decir:

$$dV_z/dz = 0$$

$$dV_z/dt = 0$$

y considerando además que:

$$V_z \text{ es función solamente de } r$$

$$V_z \text{ no es función de } \theta \text{ (esto es, } \sigma_{\theta z} = 0)$$

$$V_z \text{ no es función de } z \text{ (esto es, } \sigma_{zz} = 0)$$

y no considerando las fuerzas de gravedad, se obtiene:

$$\frac{1}{r} \frac{d(r\sigma_{rz})}{dr} = \frac{dP}{dz} \quad (2.1)$$

Si se supone que P es una función lineal de z (figura 2.2):

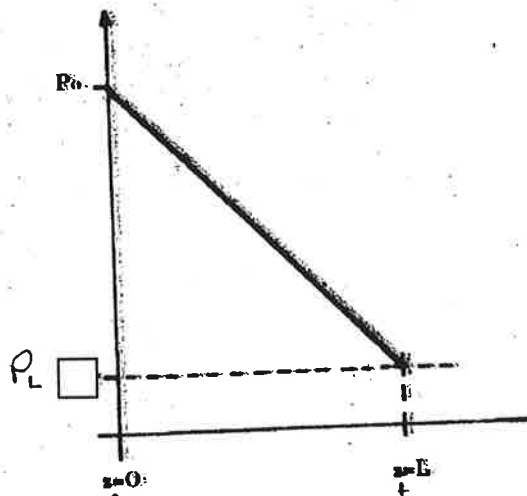


Figura 2.2 Diferencial de presión respecto de longitud

$$\frac{dP}{dz} = \frac{P_o - P_L}{0 - L} = -\frac{\Delta P}{L}$$

entonces:

$$\frac{d(r\sigma_{rz})}{rdr} = \frac{\Delta P}{L} \quad (2.2)$$

resolviendo la ecuación diferencial (2.2) respecto de r, obtenemos:

$$\sigma_{rz} = \frac{\Delta P}{2L}r + \frac{C_1}{r} \quad (2.3)$$

Aplicando las condiciones de frontera, el esfuerzo de corte es igual a cero en el centro del tubo, esto es, en $r = 0$; por lo tanto, C_1 , será igual a cero. Así, se obtiene:

$$\sigma_{rz} = \frac{r\Delta P}{2L} \quad (2.4)$$

y el esfuerzo de corte máximo ocurre en la pared del tubo, donde $r = R$:

$$\sigma = \frac{R\Delta P}{2L} \quad (2.5)$$

sustituyendo en la ecuación 2.6 la ley de Newton de la viscosidad

$$-\eta \frac{dV_z}{dr} = \frac{\Delta P}{2L}r \quad (2.6)$$

resolviendo la ecuación diferencial, se obtiene:

$$V_z = \frac{\Delta P}{4\eta L} r^2 + C_2 \quad (2.7)$$

la velocidad V_z es igual a cero en la pared del canal, es decir, en $r = R$; así:

$$C_2 = \frac{\Delta P}{4\eta L} R^2 \quad (2.8)$$

sustituyendo:

$$V_z = \frac{\Delta P}{4\eta L} R^2 [1 - (r/R)^2] \quad (2.9)$$

Se tiene que V_z es igual a V_z máxima en el centro del tubo, es decir, en $r = 0$; así:

$$V_{z\max} = \frac{\Delta P}{4\eta L} R^2 \quad (2.10)$$

La velocidad promedio (V_z) se determina de la siguiente forma:

$$(V_z) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R V_z r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\theta} \quad (2.11)$$

Como V_z no es función de θ :

$$(V_z) = \frac{\int_0^R V_z r dr}{\int_0^R r dr} \quad (2.12)$$

sustituyendo la ecuación 2.9 en 2.12 e integrando, se obtiene:

$$(V_z) = 1/2 \frac{\Delta P}{4\eta L} R^2 = 1/2 V_{z,max} \quad (2.13)$$

Por otra parte, el flujo volumétrico Q es producto de la velocidad promedio (V_z) y el área transversal al flujo (πR^2):

$$Q = 1/2 \frac{\Delta P}{4\eta L} R^2 \pi R^2 \quad (2.14)$$

Así, esta ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{R\Delta P}{2L} = \eta \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (2.15)$$

y se tiene que:

$$\sigma = \frac{R\Delta P}{2L} \quad \sigma = \eta \dot{\gamma}$$

igualando estas ecuaciones, se concluye que:

$$\text{Esfuerzo de corte} = \sigma = R\Delta P/2L \quad (2.16)$$

$$\text{Velocidad de corte} = \dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (2.17)$$

2.2.2 FLUJO A TRAVÉS DE UN CANAL DE SECCIÓN ANULAR.

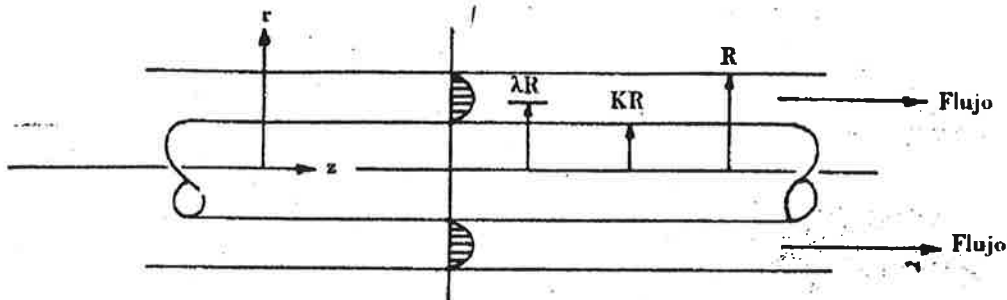


Figura 2.3 Flujo a través de un canal de sección anular

Luego de un balance de momentum (Apéndice A1, ecuación C) y considerando que:

V_z es diferente de cero

$$V_r = V_\theta = 0$$

y que se tiene estado estable, es decir:

$$dV_z/dz = 0$$

$$dV_z/dt = 0$$

y considerando además que:

V_z es función solamente de r

V_z no es función de θ (por ejemplo: $\sigma_{\theta z} = 0$)

V_z no es función de z (por ejemplo: $\sigma_{zz} = 0$)

y finalmente, no considerando las fuerzas de gravedad, se tiene:

$$\frac{1}{r} \frac{d(r\sigma_{rz})}{dr} = -\frac{dP}{dz} \quad (2.18)$$

Si se supone que P es una función lineal de z (figura 2.4)

$$\frac{dP}{dz} = \frac{P_0 - P_L}{0 - L} = -\frac{\Delta P}{L}$$

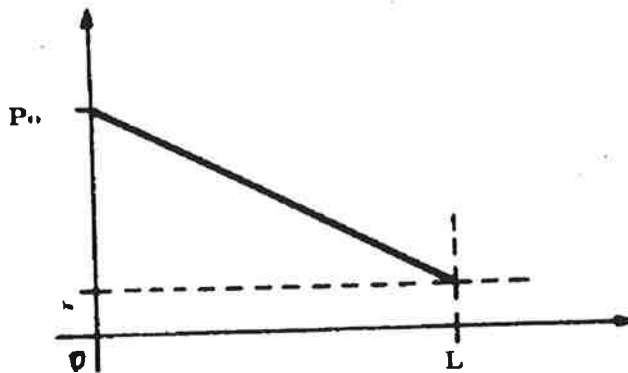


Figura 2.4 Gráfica presión & longitud

entonces:

$$\frac{1}{r} \frac{d(r\sigma_r)}{dr} = -\frac{dP}{dz} \quad (2.19)$$

$$\int \frac{d(r\sigma_r)}{dr} dr = \frac{\Delta P}{L} \int r dr \quad (2.20)$$

$$\sigma_r = \frac{\Delta P}{2L} r + \frac{C_1}{r} \quad (2.21)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.21 la Ley de Newton de la viscosidad

$$-\eta \frac{dV_z}{dr} = \frac{\Delta P}{2L} r + \frac{C_1}{r} \quad (2.22)$$

e integrando, la ecuación diferencial (2.22), se tiene:

$$V_z = -\frac{\Delta P}{4\eta L} r^2 - \frac{C_1}{\eta} \ln r + C_2 \quad (2.23)$$

La velocidad V_z es igual a cero en las paredes del canal anular, es decir, en $r = R$ y en $r = KR$, así:

$$C_1 = \frac{\Delta P}{4L} R^2 \frac{1-K^2}{\ln K} \quad (2.24)$$

$$C_2 = \frac{\Delta P}{4L} R^2 \left(1 + (1-K^2) \frac{\ln R}{\ln K} \right) \quad (2.25)$$

sustituyendo las ecuaciones 2.24 y 2.25 en la 2.23 se obtiene:

$$V_z = \frac{\Delta P}{4\eta L} R^2 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} - \frac{1-K^2}{\ln K} \ln \frac{r}{R} \right) \quad (2.26)$$

Además, se tiene que V_z es igual a V_z máxima en el punto donde $r/R = \lambda$, (por ejemplo en el punto donde $r = \lambda R$); así:

$$V_{z,max} = \frac{\Delta P}{4\eta L} R^2 \left(1 - \lambda^2 - \frac{1-K^2}{\ln K} \ln \lambda \right) \quad (2.27)$$

donde:

$$\lambda^2 = \frac{r^2}{R^2} = -\frac{(1-K^2)}{2 \ln K} \quad (2.28)$$

La velocidad promedio (V_z) se determina de la siguiente forma:

$$(V_z) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{KR}^R V_z r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_{KR}^R r dr d\theta} \quad (2.29)$$

Como V no es función de θ , se tiene:

$$(V_z) = \frac{\int_{KR}^R V_z r dr}{\int_{KR}^R r dr} \quad (2.30)$$

Sustituyendo la ecuación 2.26 en 2.30 y luego integrando, se obtiene:

$$(V_z) = \frac{\Delta P}{8\eta L} R^2 \left((1 + K^2) + \frac{1 - K^2}{\ln K} \right) \quad (2.31)$$

Por otro lado, el flujo volumétrico Q es producto de la velocidad promedio (V_z) y del área transversal al flujo $\pi R^2 (1 - K^2)$, es decir:

$$Q = R^2 (1 - K^2) \left(R^2 (1 + K^2) + R^2 (1 - K^2) / \ln K \right) (\pi \Delta P / 8 \eta L) \quad (2.32)$$

*Nota: La distancia radial donde ocurre la velocidad máxima, es decir, el valor de λ o de r/R , se obtiene al igualar a cero la primera derivada de la ecuación 2.74 y resolviendo para obtener r/R .

$$Q = B_2 (B_1 + B_2 / \ln k) (\pi \Delta P / 8 \eta L) \quad (2.33)$$

donde:

$$B_1 = R^2 (1 + K^2) - (\text{radio ext})^2 + (\text{radio int})^2$$

$$B_2 = R^2 (1 - K^2) - (\text{radio ext})^2 - (\text{radio int})^2$$

combinando la ecuación 2.21, evaluada en $r = R$ con la ecuación 2.24, se obtiene:

$$\sigma = \frac{R\Delta P}{2L} \left(\frac{B_2 + 2R^2 \ln K}{2R^2 \ln K} \right) \quad (2.34)$$

reestructurando la ecuación 2.33, se tiene:

$$\eta \frac{4Q}{\pi B_2} \frac{1}{(B_1 + B_2 / \ln K)} = \frac{\Delta P}{2L} \quad (2.35)$$

y multiplicando ambos lados de esta ecuación 2.35 por $[(B_2 + 2R^2 \ln K) / (2R^2 \ln K)]$ y acomodando, se obtiene:

$$\eta \frac{4Q}{\pi R B_2} \left(\frac{B_2 + 2R^2 \ln K}{2(B_2 + B_1 \ln K)} \right) = \frac{R\Delta P}{2L} \left(\frac{B_2 + 2R^2 \ln K}{2R^2 \ln K} \right) \quad (2.36)$$

considerando las ecuaciones 2.34 y 2.36, y que $\sigma = \eta\gamma'$, se obtiene:

$$\text{Esfuerzo de corte} = \sigma = \frac{R\Delta P}{2L} \left(\frac{B_2 + 2R^2 \ln K}{2R^2 \ln K} \right) \quad (2.37)$$

$$\text{Velocidad de corte} = \dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R B_2} \left(\frac{B_2 + 2R^2 \ln K}{B_2 + B_1 \ln K} \right) \quad (2.38)$$

2.3 FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

En este tema se lleva a cabo la determinación de la “n” potencia del comportamiento de un flujo al transportarse por un canal de sección circular.

2.3.1 FLUJO A TRAVES DE UN CANAL DE SECCIÓN CIRCULAR

Al igual que en el caso de fluidos newtonianos, luego de un balance de momentum se obtiene:

$$\sigma_{rz} = \frac{\Delta P}{2L} r \quad (2.39)$$

Sustituyendo la ecuación de la ley de la potencia en la ecuación 2.39, se obtiene:

$$-K \left(\frac{dV_z}{dr} \right)^n = \frac{\Delta P}{2L} r \quad (2.40)$$

$$dV_z = -\frac{1}{K^{1/n}} \left(\frac{\Delta P}{2L} \right)^{1/n} r^{1/n} dr \quad (2.41)$$

Si se definen las siguientes variables:

$$\frac{1}{K^{1/n}} = A \quad \frac{1}{n} = m$$

se tiene:

$$dV_z = -A \left(\frac{\Delta P}{2L} \right)^m r^m dr \quad (2.42)$$

e integrando:

$$V_z = A \left(\frac{\Delta P}{2L} \right)^m \frac{r^{m+1}}{m+1} + C \quad (2.43)$$

La velocidad V_z es igual a cero en la pared del canal, es decir, en $r = R$, así:

$$C = A \left(\frac{\Delta P}{2L} \right)^m \frac{R^{m+1}}{m+1} \quad (2.44)$$

sustituyendo:

$$V_z = A \left(\frac{\Delta P}{2L} \right)^m \frac{R^{m+1}}{m+1} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{m+1} \right) \quad (2.45)$$

Igual que en el caso de fluidos newtonianos, la velocidad V_z es igual a V_z máxima en el centro del tubo, es decir, en $r = 0$, así:

$$V_z \text{ max} = A \left(\frac{\Delta P}{2L} \right)^m \frac{R^{m+1}}{m+1} \quad (2.46)$$

Como en el caso de fluidos newtonianos, la velocidad promedio (V_z), se determina de la siguiente forma:

$$(V_z) = \frac{\int_0^R V_z r dr}{\int_0^R r dr} \quad (2.47)$$

sustituyendo la ecuación 2.45 en 2.47 e integrando, se obtiene:

$$(V_z) = A \left(\frac{\Delta P}{2L} \right)^m \frac{R^{m+1}}{m+1} \frac{m+1}{m+3} = \frac{m+1}{m+3} V_z \text{ max} \quad (2.48)$$

Por otra parte, el flujo volumétrico Q es producto de la velocidad promedio (n) y el área transversal al flujo (πR^2):

$$Q = A \left(\frac{\Delta P}{2L} \right)^m \frac{R^{m+1}}{m+1} \frac{m+1}{m+3} \pi R^2 \quad (2.49)$$

sustituyendo las definiciones que se habían dado para a y para m , y reestructurando, se obtiene:

$$4Q = \frac{4n}{3n+1} \left(\frac{R\Delta P}{2LK} \right)^{1/n} \pi R^3 \quad (2.50)$$

y así se obtiene:

$$\frac{R\Delta P}{2L} = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right)^n \quad (2.51)$$

(A esta ecuación, se le conoce como "ecuación de Rabinowitsch). Sin embargo, para fines prácticos se asume que:

$$K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n = K' \quad (2.52)$$

y así se obtiene:

$$\frac{R\Delta P}{2L} = K' \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right)^n \quad (2.53)$$

es decir: $\sigma = K' \gamma^n$

donde n (índice de la ley de la potencia) está definido como:

$$n = \frac{d \log(R\Delta P / 2L)}{d \log(4Q / \pi R^3)} \quad (2.54)$$

En este capítulo se ha desarrollado la metodología para la obtención de “n” índice de potencia; dicha metodología será empleada en el capítulo 6 para la determinación de las curvas reológicas de polietileno reciclado, así, de esta manera conocer el comportamiento del fluido.

En el siguiente capítulo se realizará el estudio del flujo en un extrusor, para el conocimiento de las variables que actúan en un extrusor al permitir el paso de un flujo y la determinación de las condiciones de frontera para desarrollar el diseño del dado.

CAPITULO 3 ESTUDIO DEL FLUJO EN UN EXTRUSOR

3.1 FLUJO EN UN EXTRUSOR

La sección de husillo y barril de un extrusor tiene cuatro funciones principales (presurizar, calentar, mezclar y bombear). Para hacer cada función más eficiente es práctica normal dividir esta parte del extrusor en tres zonas (figura 3.1):

1. Zona de alimentación
2. Zona de compresión
3. Zona de dosificación o de bombeo

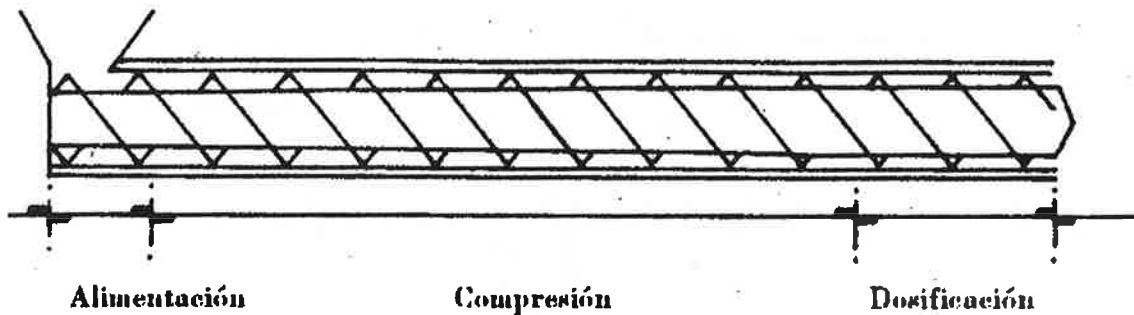


Figura 3.1 Husillo y barril dividido en tres zonas.

La zona de dosificación es la última zona del husillo, y para efectos de cálculo se asume que el material fluye completamente fundido en esta zona. Así, un análisis matemático simple considera solamente la zona de dosificación y supone que tiene un flujo de fluidos a través de un canal de sección transversal rectangular constante [15].

El flujo neto Q a través de un extrusor es igual a la suma algebraica del flujo de arrastre Q_D , el flujo de presión Q_p y el flujo de pérdida Q_L

$$Q = Q_D - Q_p - Q_L \quad (3.1)$$

El flujo de arrastre (figura 3.2) se desplaza hacia delante y ocurre debido al movimiento de una superficie (husillo) en contacto con el fluido, mientras que otra superficie, también en contacto con el fluido (barril), permanece fija.

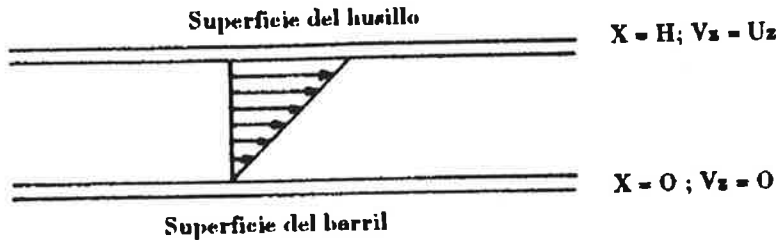


Figura 3.2 Flujo de arrastre entre superficie de husillo y superficie de barril.

El flujo de presión (figura 3.3) circula hacia atrás y ocurre debido a una diferencia de presiones, es decir, alta presión hacia la región de salida y baja presión hacia la región de entrada (presión atmosférica).

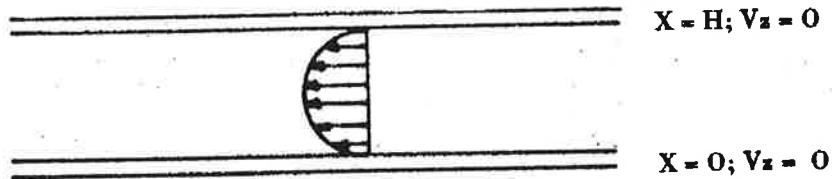


Figura 3.3. Flujo de presión entre superficie de husillo y superficie de barril.

El flujo de pérdida es también un flujo hacia atrás debido a la misma diferencia de presiones, sólo que es un flujo que ocurre no a través del canal del husillo sino por el espacio que existe entre los bordes de las hélices del husillo y la pared del barril. Sin embargo, para efectos de cálculo este es un flujo que puede omitirse. Así, el flujo neto Q se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q = Q_D - Q_P \quad (3.2)$$

La figura 3.4 muestra un diagrama en dos dimensiones de un sistema husillo-barril, con la descripción de las variables implicadas.

$$U_z = V \cos \theta = \pi DN \cos \theta$$

$$w = E \cos \theta = nD \sin \theta$$

$$dP/dz = \Delta P / Z = \Delta P / (L / \sin \theta)$$

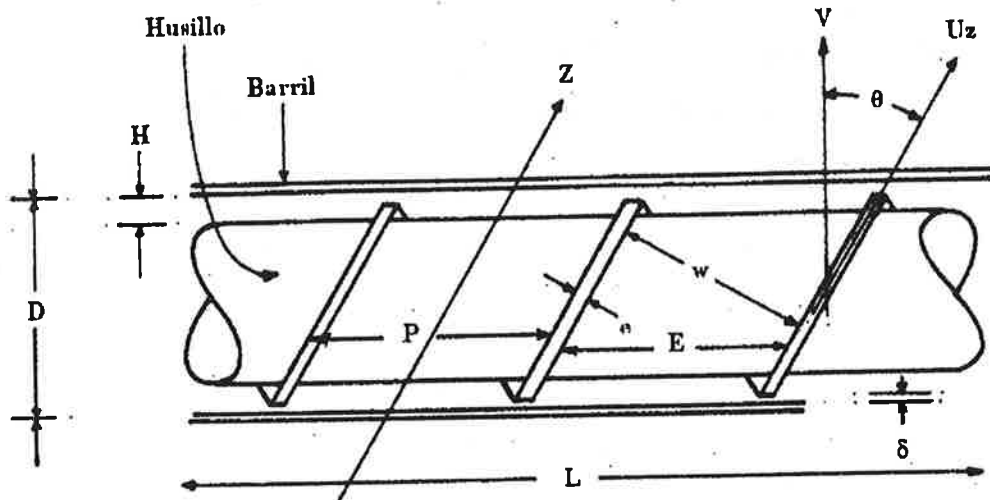


Figura 3.4 Diagrama husillo-barril

Definición de variables utilizados:

H = Profundidad del canal del husillo [cm]

w = ancho del canal del husillo [cm]

D = diámetro del barril [cm]

L = longitud del husillo [cm]

Z = longitud del canal del husillo [cm]

E = longitud (axial) entre dos hélices del husillo [cm]

e = espesor de la hélice del husillo [cm]

P = longitud de campo i.e. longitud entre el inicio de una hélice y el inicio de la siguiente [cm]

delta = separación entre la hélice y el barril [cm]

$\theta =$ ángulo entre la hélice y la dirección perpendicular al husillo [grados]

$N =$ velocidad de rotación del husillo [rev/seg]

$V =$ velocidad tangencial de rotación del husillo [cm/seg]

$U_z =$ velocidad máxima del fluido en dirección del canal [cm/seg]

$Q =$ gasto/flujo volumétrico [cm³/seg]

$\Delta P =$ gradiente de presión a lo largo del barril [dinas/cm³]

$\eta =$ viscosidad del flujo [dina seg /cm² = poises]

3.1.1 ANALISIS DE FLUJO EN UN EXTRUSOR, PARA FLUIDOS NEWTONIANOS BAJO CONDICIONES ISOTERMICAS

Con base en la teoría simplificada de flujo, y luego de un balance de momento (Apéndice A1, ecuación F), y considerando además que:

V_z es diferente a cero

$$V_x = V_y = 0$$

y que se tiene estado estable, es decir:

$$dV_z/dz = 0$$

$$dV_z/dt = 0$$

y considerando también que:

V_z es función solamente de x

V_z no es función de y [supuesto válido cuando el análisis se hace de acuerdo con la teoría simplificada de flujo V_z no es función de z].

Además, no considerando las fuerzas de gravedad, se obtiene:

$$d^2V_z/dx^2 = 1/\eta [dP/dz] \quad (3.3)$$

y luego de una integración se obtiene:

$$V_z = \frac{1}{\eta} \frac{x^2}{2} \frac{dP}{dz} + C_1 x + C_2 \quad (3.4)$$

La velocidad V_z es igual a cero en la pared del barril, es decir, en $x = 0$; además, la velocidad V_z es igual a U_z en la pared del husillo, es decir, en $x = H$. Así:

$$C_2 = 0 \quad (3.5)$$

$$C_1 = \frac{U_z}{H} - \frac{H}{2\eta} \frac{dP}{dz} \quad (3.6)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.5 y 3.6 en la ecuación 3.4 se obtiene:

$$V_z = \frac{1}{\eta} \frac{x^2}{2} \frac{dP}{dz} + \left(\frac{U_z}{H} - \frac{1}{\eta} \frac{H}{2} \frac{dP}{dz} \right) x \quad (3.7)$$

La velocidad promedio (V_z) se obtiene de la siguiente forma:

$$(V_z) = \frac{\int_0^W \int_0^H V_z dx dy}{\int_0^W \int_0^H dx dy} \quad (3.8)$$

Como V_z no es función de y :

$$(V_z) = \frac{\int_0^H V_z dx}{\int_0^H dx} \quad (3.9)$$

Sustituyendo la ecuación 3.7 en la ecuación 3.9 e integrando, se obtiene:

$$(V_z) = \frac{U_z}{2} - \frac{H^2}{12\eta} \frac{dP}{dz} \quad (3.10)$$

El flujo volumétrico Q es producto de la velocidad promedio (\bar{v}) por el área transversal al flujo wH :

$$Q = (\bar{V}_z) wH \quad (3.11)$$

$$Q = \frac{1}{2} U_z wH - \frac{wH^2}{12\eta} \frac{dP}{dz} \quad (3.12)$$

En la ecuación 3.12 el primer término de la derecha representa el flujo de arrastre y el segundo término el flujo de presión, tal y como se describe en la ecuación 3.2, es decir:

$$Q_D = \frac{1}{2} U_z wH \quad (3.13)$$

$$Q_p = \frac{wH^3}{12\eta} \frac{dP}{dz} \quad (3.14)$$

El flujo de arrastre Q_D depende sólo de la geometría y de la velocidad de rotación del husillo, mientras que el flujo de presión Q_p depende de la geometría del husillo, y además de la diferencia de presiones y de la viscosidad del fluido.

Considerando la ecuación 3.13 y tomando en cuenta la geometría del husillo y barril, se tiene:

$$U_z = V \cos \theta = \pi DN \cos \theta \quad (3.15)$$

$$w = E \cos \theta = \pi D \sin \theta \quad (3.16)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.15 y 3.16 en 3.13 se tiene:

$$Q_D = 1/2 \pi^2 D^2 H N \operatorname{sen} \theta \cos \theta \quad (3.17)$$

$$Q_D = \alpha N \quad (3.18)$$

donde:

$$\alpha = 1/2 \pi^2 D^2 H \operatorname{sen} \theta \cos \theta \quad (3.19)$$

Considérese ahora la ecuación 3.14, suponiendo P como función lineal de z, se obtiene:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{P_z - P_0}{Z - 0} = \frac{\Delta P}{Z} \quad (3.20)$$

Si además se considera que Z representa la longitud del canal del husillo y L la longitud del husillo, éstas estarán relacionadas de la siguiente forma:

$$Z = L / \operatorname{sen} \theta \quad (3.21)$$

Así, combinando estas dos últimas ecuaciones se obtiene:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{\Delta P}{L / \operatorname{sen} \theta} \quad (3.22)$$

y además:

$$w = \pi D \operatorname{sen} \theta \quad (3.23)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.22 y 3.23 en 3.14 se tiene:

$$Q_P = \frac{1}{12\eta} \pi D H^3 \operatorname{sen}^2 \theta \frac{\Delta P}{L} \quad (3.24)$$

$$Q_P = \beta (\Delta P / \eta) \quad (3.25)$$

donde:

$$\beta = \frac{1}{12\eta} \pi D H^3 \sin^2 \theta \quad (3.26)$$

La ecuación que define el flujo neto de un extrusor será entonces:

$$Q = \alpha N - \beta (\Delta P / \eta) \quad (3.27)$$

Cabe mencionar que para obtener las ecuaciones anteriores, se hicieron las siguientes suposiciones:

1. Condiciones isotérmicas en el extrusor
2. Fluido newtoniano.
3. La relación H/D es pequeña.
4. No hay flujo de pérdida ($Q_L = 0$)
5. Espesor de la hélice despreciable.
6. Las propiedades físicas del fluido son constantes.

A pesar de la posible falta de validez de las anteriores suposiciones, las ecuaciones simplificadas que se obtienen son muy útiles para hacer un análisis semicuantitativo de un extrusor. Por ejemplo, al graficar Q vs ΔP de la ecuación 3.27 se tiene:

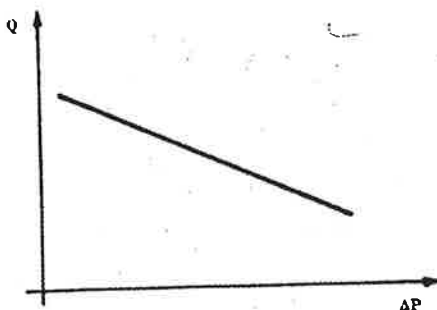


Figura 3.5 Gráfica Q vs ΔP

En este caso, la ecuación 3.27 representa una línea recta con pendiente igual a $-\beta/\eta$ y con intersección en el eje de las ordenadas igual a αN .

La pendiente de la línea recta se incrementa al aumentar β (es decir, al aumentar D , H^3 o $\sin^2 \theta$; o al disminuir L) o al disminuir η . La intersección de la línea recta en el eje de ordenadas se incrementa al aumentar α (es decir, al aumentar D^2 , H o $\sin \theta \cos \theta$) o al aumentar N . (Esta línea característica del extrusor será una línea recta cuando se tenga un fluido newtoniano y condiciones isotérmicas. Ver tabla 3.1, apéndice A2)

Por ejemplo, al comparar gráficamente dos husillos con diferente profundidad de canal H_1 y H_2 , donde $H_2 = 1.5H_1$ se observa (figura 3.6):

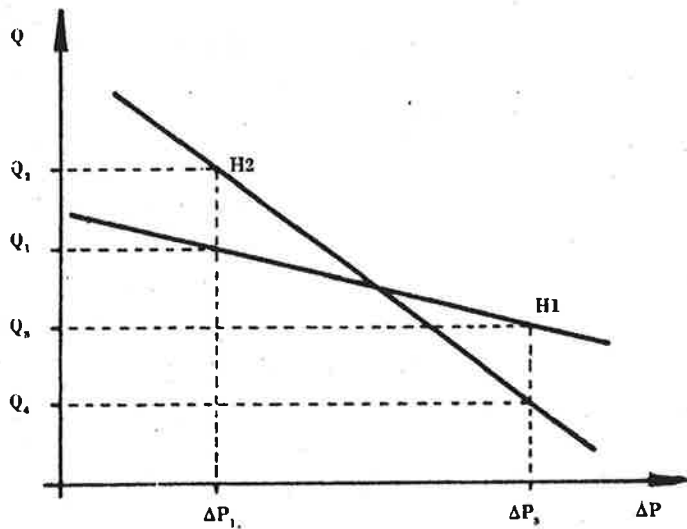


Figura 3.6 Gráfica Q & ΔP

Al aumentar H se incrementó tanto el valor de la intersección como el valor de la pendiente; esto hace que las dos líneas se crucen. Así, si se está operando a un nivel de presión igual a ΔP_1 , un aumento en la profundidad del canal desde H_1 hasta H_2 resulta en un aumento en la velocidad de flujo desde Q_1 hasta Q_2 . Sin embargo, si se está operando a un nivel de presión igual a ΔP_2 , un aumento en la profundidad del canal desde H_1 hasta H_2 resulta en una disminución en la velocidad de flujo desde Q_3 hasta Q_4 . De igual forma, al aumentar la velocidad de rotación del husillo N se obtiene un aumento en la velocidad de flujo Q (figura 3.7).

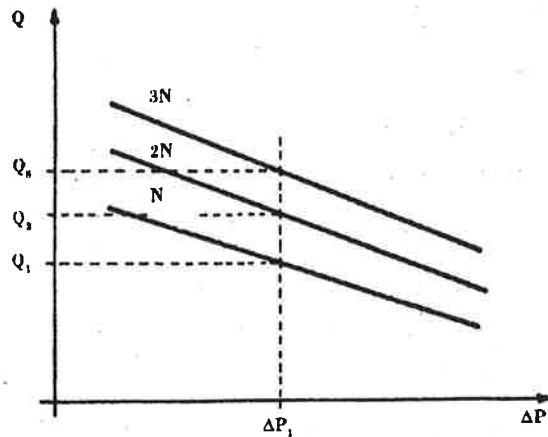


Figura 3.7 Gráfica Q & ΔP

Variación existente en la velocidad de flujo de un extrusor al modificar algunas características del husillo y de la operación. Se utiliza la ecuación (3.27):

$$Q = \alpha N - \beta (\Delta P / \eta)$$

Las características que se tienen son inicialmente:

$$D_1 = 5 \text{ cm}$$

$$H_1 = 0.5 \text{ cm}$$

$$\theta_1 = 17^\circ$$

$$L_1 = 30 \text{ cm}$$

$$N_1 = 100 \text{ rpm}$$

$$\Delta P_1 = 200 \text{ kg/cm}^2 = 200 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2$$

$$\eta_1 = 10,000 \text{ poises (dinas seg/cm}^2\text{)}$$

Con estos datos, y utilizando la ecuación 3.27, se tiene:

$$Q_1 = 1,166 \text{ cm}^3/\text{min}$$

Se deduce que:

- Al aumentar el diámetro del husillo desde D_1 (5 cm) hasta D_2 (8 cm) se obtiene un aumento bastante considerable en el flujo Q , desde 1,166 hasta 3,520 cm^3/min

- al aumentar la profundidad del canal del husillo desde H_1 (0.5 cm) hasta H_2 (0.8 cm) se obtiene una disminución en el flujo Q , desde 1,166 hasta 468 cm^3/min [Sin embargo, en este caso el flujo Q alimentaría al pasar de H_1 a H_2 si la presión de trabajo ΔP hubiera sido menor, e. g. $50\text{kg}/\text{cm}^2$. Ver figura 3.6].
- al alimentar el ángulo de la hélice del husillo desde θ_1 (17°) hasta θ_2 (25°) se obtiene un muy ligero aumento en el flujo Q , desde 1,166 hasta 1,194 cm^3/min
- al alimentar la velocidad de rotación del husillo desde N_1 (100rpm) hasta N_2 (150 rpm) se obtiene un aumento considerable en el flujo Q , desde 1,166 hasta 2,028 cm^3/min
- al aumentar la presión desde ΔP_1 ($200\text{ kg}/\text{cm}^2$) hasta ΔP_2 ($300\text{ kg}/\text{cm}^2$) Se obtiene una disminución en el flujo Q , desde 1, 166 hasta 886 cm^3/min .
- al aumentar la viscosidad del compuesto desde η_1 , (10,000 poises) hasta η_2 , (50,000 poises) se obtiene un aumento en el flujo Q , desde 1,166 hasta 1,613 cm^3/min .

[Debe de entenderse que esto es una simplificación. En realidad, un cambio en alguna de las variables mencionadas puede a su vez producir cambios en otras variables. Por ejemplo, un aumento en la velocidad de rotación del husillo puede producir inicialmente un incremento en la (ΔP), seguido por una disminución en la viscosidad del plástico fundido (por operar ahora a una mayor velocidad de corte), etc.]

Variando parámetros se obtiene la tabla 3.2 (apéndice A2).

3.1.1.1 FLUJO EN LA ZONA DE ALIMENTACION

Lo ideal es que cada vuelta o revolución del husillo se transporte desde la zona de alimentación hacia delante un volumen de material igual al volumen de una vuelta del canal del husillo, es decir, **VOLUMEN X RPM X DENSIDAD APARENTE**.

$$\text{Flujo [g /min]} = w \pi H (D - H) N \rho$$

Suponiendo paso cuadrado (es decir, diámetro D igual a longitud de campo P), resulta que θ es igual a 17.7° , y fijando además $w = 0.95 D$, se obtiene:

$$\text{Flujo [g /min]} = 2.98 DH (D - H) N \rho$$

$$\text{Flujo [kg /hr]} = 0.179 DH (D - H) N \rho$$

donde:

D = Diámetro del canal en la zona de alimentación [cm]

H = Profundidad del canal en la zona de alimentación [cm]

N = Velocidad de rotación del husillo [rpm]

ρ = Densidad aparente del plástico que se utiliza, [g/cms] (tabla 3.3 Apéndice A2)

El área circunferencial de una vuelta de la pared del canal del husillo se determina de la siguiente forma:

$$\pi D^2/4 - \pi(D - 2H)^2/4 - \pi H (D - H)$$

El volumen de una vuelta del canal del husillo es el producto del área circunferencial de una vuelta de la pared del canal del husillo multiplicado por el ancho del mismo canal w, así:

$$w\pi H(D-H)$$

Sin embargo, el flujo real que se logra es casi siempre 20 - 40% del flujo ideal que se calcula por medio de esta ecuación, pero los barriles rugosos y la alimentación forzada pueden aumentar esta cifra al 75% o más.

3.1.1.2 FLUJO EN LA ZONA DE DOSIFICACION.

De la ecuación (3.20) se desprende:

$$Q_D = 1/2 \pi^2 D^2 HN \sin \theta \cos \theta$$

y de la ecuación (3.16):

$$w = \pi D \sin \theta \Rightarrow D = w / (\pi \sin \theta)$$

sustituyendo ahora la ecuación (3.16) en la (3.17) se tiene:

$$\text{Flujo [g/min]} = Q_D = 1/2 \pi w D H N \cos \theta$$

Suponiendo paso cuadrado (esto es, diámetro D igual a longitud de campo P), resulta que θ es igual a 17.7° , y fijando además $w = 0.95 D$,

se obtiene:

$$\text{Flujo [g lmin]} = 1.420 D^2 H N \rho$$

$$\text{Flujo [kg /hr]} = 0.085 D^2 H N \rho$$

Determinación de flujo en la zona de dosificación, de LDPE, cuando se tienen las siguientes condiciones:

$$D = 120 \text{ mm}$$

$$H = 5 \text{ mm}$$

$$\theta = 17.70$$

$$\rho = 0.76 \text{ g/cm}^3$$

$$N = 100 \text{ rpm}$$

Con estos datos se obtiene:

$$\text{Flujo o gasto} = 466 \text{ kg/hr}$$

Si la salida real que se obtiene está por arriba o por abajo de la salida de dosificación calculada, algunas posibles causas podrían ser:

SALIDA REAL MUY ALTA

Sobrealimentación; (esta puede producir sobrecalentamiento, desgaste del husillo, y cambios de color).

Contribuyen a esta condición la baja resistencia del dado y la alta viscosidad del plástico.

SALIDA REAL MUY BAJA

Problemas en la alimentación:

baja densidad aparente

obstrucción en la tolva

deslizamiento en la zona de alimentación (poca mordida)

bloqueo en el canal del husillo

adherencia en la base del husillo

alta resistencia en el dado

desgaste excesivo del husillo

plastificación muy lenta.

3.1.2 ANALISIS GRAFICO COMPARATIVO DE FLUJO PARA FLUIDOS NEWTONIANOS Y CONDICIONES ISOTERMICAS

Hasta aquí se ha considerado solamente el comportamiento del fluido a lo largo del canal del husillo. Sin embargo, la operación de un extrusor depende tanto del husillo como del dado. Considerando ahora el flujo a través del dado, se tiene que la velocidad de flujo de un fluido newtoniano es directamente proporcional a la caída de presión e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. Así, se tiene:

$$Q = k (\Delta P / \eta) \quad (3.28)$$

donde k es una constante de proporcionalidad que depende de la geometría del dado.

La ecuación 3.28 supone que se tiene un fluido newtoniano en condiciones isotérmicas, lo que no es válido necesariamente. Sin embargo, esta ecuación simplificada es muy útil para hacer un análisis semicuantitativo de un dado.

Por ejemplo, al graficar Q vs ΔP de la ecuación 3.28 se tiene:

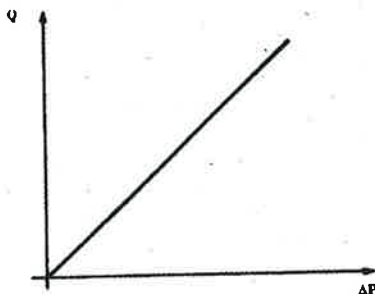


Figura 3.7 Gráfica Q vs ΔP

En este caso, la ecuación 3.28 representa una línea recta con pendiente igual a k/η y con intersección en el eje de las ordenadas igual a cero. La pendiente de esta línea recta se incrementa al aumentar k y al disminuir η . [Esta línea característica del dado será una línea recta cuando se tenga un fluido newtoniano y condiciones isotérmicas.] Por ejemplo, al comparar gráficamente (figura 3.8) dos dados con diferente geometría (diferente k), se observa lo siguiente:

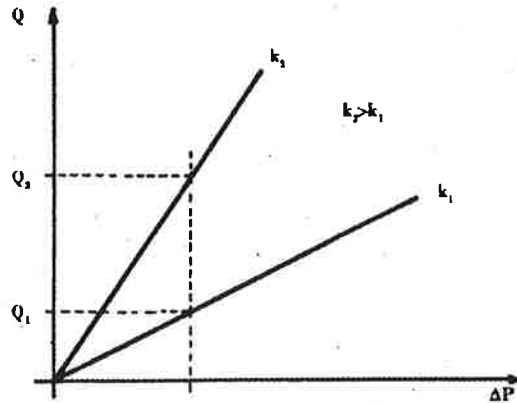


Figura 3.8 Comparación de la variación de k

Para un mismo nivel de presión, un aumento en el valor de la constante k (desde k_1 hasta k_2) produce un aumento en la velocidad de flujo (desde Q_1 hasta Q_2). Igualmente, una disminución en la viscosidad del fluido producirá un aumento en la velocidad de flujo.

El punto de intersección entre la línea característica del husillo y la línea característica del dado (puntos A, B, C y D en la figura 3.9) representa el punto de operación del extrusor bajo esas determinadas condiciones.

En la figura 3.9 se observa que al aumentar la profundidad del canal del husillo (desde H_1 hasta H_2), cuando se tiene un dado con una constante grande (k_2), se produce un aumento en la velocidad de flujo (desde C hasta D). Sin embargo, el mismo aumento en la profundidad del canal (desde H_1 hasta H_2) cuando se tiene un dado con una constante pequeña (k_1), produce una disminución en la velocidad de flujo desde A hasta B).

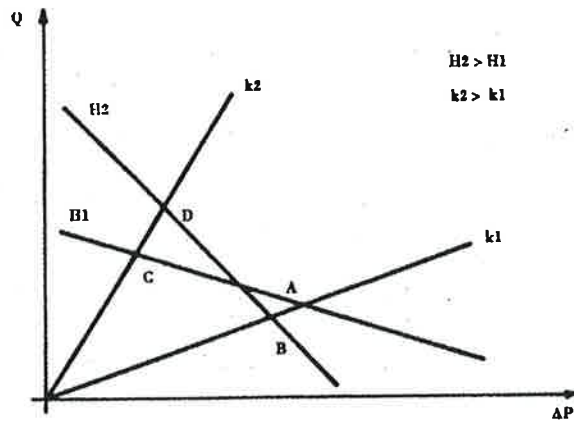


Figura 3.9 Gráfica punto de operación del extrusor

La tabla 3.4 (apéndice A2), presenta la ecuación característica del dado, tanto para fluidos newtonianos como para fluidos de la ley de la potencia. Se presentan los casos simples para los casos en que el dado tiene un conducto circular, un conducto rectangular (rendija) y un conducto anular. Si se toma la ecuación que define el flujo de un fluido newtoniano a través de un canal circular (ecuación 2.17)

$$Q = \frac{\pi R^4}{8L} \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right) \quad (3.29)$$

y se compara con la ecuación característica del dado, se advierte que la constante k queda definida por:

$$K = \frac{\pi R^4}{8L} \quad (3.30)$$

Para el caso de flujo de fluidos newtonianos a través de un conducto rectangular, la constante k queda definida por:

$$K = \frac{wH^3}{2L} \quad (3.31)$$

Se observa que el valor de k aumenta al incrementarse el área de paso a través del dado o al disminuir la longitud del dado.

3.2 CALCULO DE FLUJO VOLUMETRICO A TRAVES DE UN SISTEMA EXTRUSOR / DADO

El cálculo de flujo volumétrico toma como datos los parámetros con que se realiza el experimento.

Con las siguientes características:

extrusor

$$D = 5 \text{ cm}$$

$$H = 0.5 \text{ cm}$$

$$L = 50 \text{ cm}$$

$$\theta = 17^\circ$$

$$N = 1 \text{ rev/seg}$$

dado

$$R = 0.20 \text{ cm}$$

$$L = 0.60 \text{ cm}$$

(considerando fluido newtoniano)

$$Q = \alpha N - \beta(\Delta P / \eta)$$

$$\alpha = 1/2\pi^2 D^2 H \sin \theta \cos \theta = 17.25 \text{ cm}^3$$

$$\beta = (\pi)/(12L) DH^3 \sin^2 \theta = 0.28 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

$$Q = 17.25 - 0.28 \times 10^{-3} (\Delta P / \eta) \text{ [extrusor]}$$

$$Q = 1.05 \times 10^{-3} (\Delta P / \eta) \text{ [dado]}$$

combinando las ecuaciones Q[extrusor] y Q[dado] se tiene:

$$17.25 - 0.28 \times 10^{-3} (\Delta P / \eta) = 1.05 \times 10^{-3} (\Delta P / \eta)$$

$$(\Delta P / \eta) = 13\ 000$$

considerando $\eta = 10,000$ poises, se obtiene:

$$\Delta P = 130 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2 = 130 \text{ kg/cm}^2$$

Este valor de ΔP se sustituye ahora en 3a o en 3b :

$$Q = 17.25 - 0.28 \times 10^{-3} (\Delta P / \eta) = 13.6 \text{ cm}^3/\text{seg} = 816 \text{ cm}^3/\text{rmin}$$

$$Q = 1.05 \times 10^{-3} (\Delta P / \eta) = 13.6 \text{ cm}^3/\text{seg} = 816 \text{ cm}^3/\text{min}$$

Considerando fluido de la ley de la potencia:

$$Q = 17.25 - 0.28 \times 10^{-3} (\Delta P / \eta) \text{ [extrusor]}$$

donde:

$$\eta = K \left(\frac{\pi D N \cos \theta}{H} \right)^{n-1}$$

Sustituyendo esta última en la ecuación del extrusor se tiene:

$$Q = 17.25 - \left(\frac{0.28 \times 10^{-3}}{K(30)^{n-1}} \right) \Delta P \quad \text{[extrusor]}$$

donde:

$$\eta = K \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right)^{n-1}$$

Sustituyendo esta última en la ecuación del dado se tiene:

$$Q = \left(\frac{1.05 \times 10^{-3}}{K(159)^{n-1}} \right)^{\frac{1}{n}} \Delta P^{1/n} \quad \text{[dado]}$$

a) Para un fluido con las siguientes características:

$$n = 0.8$$

$$K = 30,000 \text{ dinas seg}^n/\text{cm}^2$$

$$Q = 17.25 - 18.43 \times 10^{-9} \Delta P \text{ [extrusor]}$$

$$Q = 1.70 \times 10^{-9} \Delta P^{1/n} \text{ [dado]}$$

Combinando ahora las dos ecuaciones anteriores se tiene:

$$\Delta P^{1/n} + 10.84 \Delta P - 10.15 \times 10^9 = 0$$

De esta última ecuación se obtiene:

$$\Delta P = 93 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2 = 93 \text{ kg/cm}^2$$

Este valor de ΔP se sustituye ahora en 3c o 3d:

$$Q = 17.25 - 18.43 \times 10^9 \Delta P = 15.5 \text{ cm}^3/\text{seg} = 930 \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$Q = 1.70 \times 10^{-9} \Delta P^{1.25} = 15.5 \text{ cm}^3/\text{seg} = 930 \text{ cm}^3/\text{min}$$

b) Para un fluido con las siguientes características:

$$n = 0.5$$

$$K = 60,000 \text{ dinas seg}^n/\text{cm}^2$$

se obtiene:

$$Q = 17.25 - 25.56 \times 10^{-9} \Delta P \text{ [extrusor]}$$

$$Q = 48.69 \times 10^{-15} \Delta P^{1/n} \text{ [dado]}$$

Combinando ahora las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\Delta P^{1/n} + 0.525 \times 10^6 \Delta P - 354.28 \times 10^{12} = 0$$

De esta última ecuación se obtiene:

$$\Delta P = 185 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2 = 185 \text{ kg/cm}^2$$

Este valor de ΔP se sustituye ahora en $Q[\text{extrusor}]$ o $Q[\text{dado}]$, se obtiene:

$$Q = 17.25 - 25.56 \times 10^{-9} \Delta P = 16.67 \text{ cm}^3/\text{seg} = 1,000 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$Q = 48.69 \times 10^{-15} \Delta P^2 = 16.67 \text{ cm}^3/\text{seg} = 1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$$

3.3 ANALISIS DE CONSUMO DE POTENCIA EN UN EXTRUSOR

En general, la potencia W es el producto de la fuerza F que se requiere para mover un objeto a una velocidad U :

$$W = F \times U$$

$$dW = dF \times U \quad (3.32)$$

En el caso de un extrusor, el movimiento del husillo en relación al barril requiere de una potencia:

$$dW = -U_y dF_y + U_z dF_z \quad (3.33)$$

$$W = \int_0^z \int_0^w [-\sigma_{xy} U_y + \sigma_{xz} U_z] dy dz \quad (3.34)$$

NOTA: $dF = \sigma_{xy} dA$ (Fuerza - Esfuerzo x Área)

$$dF_z = \sigma_{xz} dA$$

(σ_{xy} y σ_{xz} se calculan en $x = H$)

El esfuerzo de corte está dado por:

$$\sigma_{xy} = \eta \frac{dV_y}{dx} \quad (3.36)$$

Para obtener la función de V_y se hace un balance de momento (Apendice A2, ecuacion E) y se obtiene:

$$\frac{d^2V_y}{dx^2} = \frac{1}{\eta} \frac{dP}{dy} \quad (3.37)$$

Se tiene $V_y = 0$ en $x = 0$, y $V_y = -Uy$ en $x = H$. Así, luego de una integración se obtiene:

$$V_y = -\frac{x}{H}U_y + \frac{x}{2\eta}(x-H)\frac{dP}{dy} \quad (3.38)$$

A pesar de existir un movimiento en dirección y , representado por la velocidad V_y , el flujo neto Q en dirección y será igual a cero:

$$Q = (V_y)HZ = 0 \quad (3.39)$$

En esta ecuación, H y Z son diferentes de cero y solamente V_y será igual a cero:

$$(V_y) = 0 \quad (3.40)$$

Utilizando la teoría simplificada de flujo.

$$(V_y) = \frac{\int_0^z \int_0^H V_y dx dy}{\int_0^z \int_0^H dx dz} \quad (3.41)$$

Luego de simplificar, y considerando que V_y no es función de z , se obtiene:

(3.42)

$$\int_0^H V_y dx = 0$$

Sustituyendo la ecuación 3.38 en 3.42 e integrando, se obtiene:

$$\frac{dP}{dy} = -\frac{6\eta U_y}{H^2} \quad (3.43)$$

Sustituyendo la ecuación 3.43 en 3.38 se obtiene la expresión para la velocidad V_y :

$$V_y = -\frac{U_y}{H^2} \left(\frac{3x^2}{H^2} - \frac{2x}{H} \right) \quad (3.44)$$

De las ecuaciones 3.7 y 3.44 se obtiene

$$\frac{dV_z}{dx} = \frac{U_z}{H} + \frac{1}{2\eta} (2x - H) \frac{dP}{dz} \quad (3.45)$$

$$\frac{dV_y}{dx} = -\frac{2U_y}{H^2} (3x - H) \quad (3.46)$$

Se recuerda que el esfuerzo de corte se toma en $x = H$, de manera que al sustituir las ecuaciones 3.45 y 3.46 en 3.35 y 3.36 se obtiene:

$$\sigma_{xz} = \frac{\eta U_z}{H} + \frac{HdP}{2dz} \quad (3.47)$$

$$\sigma_{xy} = -\frac{4\eta U_y}{H} \quad (3.48)$$

Sustituyendo ahora las ecuaciones 3.47 y 3.48 en 3.34, se integra y se obtiene:

$$W = \left(\frac{4\eta U_y^2}{H} + \frac{\eta U_z^2}{H} + \frac{H U_z}{2} \frac{\Delta P}{Z} \right) w Z \quad (3.49)$$

(suponiendo que $dP/dz = \Delta P/z$)

W está expresado en [dinas cm/seg]

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ Joule/seg} = 1 \text{ Nm/seg} = 10^7 \text{ dinas cm/seg}$$

Se recuerda que al analizar la geometría del husillo se tenía:

$$U_z = V \cos \theta = \pi D N \cos \theta$$

$$U_y = V \sin \theta = \pi D N \sin \theta$$

$$w = \pi D \sin \theta$$

$$Z = L / \sin \theta$$

Sustituyendo estas últimas igualdades en la ecuación 3.49 y reacomodando los términos, se obtiene:

$$W = K_1 \eta Z N^2 + K_2 N \Delta P \quad (3.50)$$

donde:

$$K_1 = \frac{\pi^3 D^3 \sin \theta}{H} (1 + 3 \sin^2 \theta) \quad (3.51)$$

$$K_2 = 1/2 \pi^2 D^2 H \text{ sen } \theta \text{ cos } \theta \quad (3.52)$$

Cálculo del consumo de potencia del extrusor, utilizando la ecuación 3.52 con las siguientes características:

$$D = 5 \text{ cm}$$

$$H = 0.5 \text{ cm}$$

$$L = 50 \text{ cm}$$

$$\theta = 29^\circ$$

$$K_1 = 6,410 \text{ cm}^2$$

$$K_2 = 26 \text{ cm}^3$$

$$\eta = 18,600 \text{ dinas seg/cm}^2$$

$$Z = 103 \text{ cm}$$

$$N = 60 \text{ rev/min} = 1.0 \text{ rev/seg}$$

$$\Delta P = 180 \text{ kg/cm}^2 = 180 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2$$

se obtiene:

$$W = 17.0 \times 10^9 \text{ dinas cm/seg} = 1.70 \text{ Kwatt}$$

NOTAS:

- a) 1 Kwatt = 1.34 HP.
- b) Nótese que se considera solamente la zona de dosificación del extensor.
- c) Esto representa aproximadamente el 25% de la energía total requerida.

Se podría decir que el material menos eficiente es el que requiere de más potencia para alcanzar un determinado gasto, o alternativamente, el que alcanza un menor gasto por cada HP.

En este capítulo se ha considerado en la operación de un extrusor el comportamiento del fluido a lo largo del canal del husillo-dado. Considerando ahora el flujo a través del dado, se tiene que la velocidad de flujo de un fluido newtoniano es directamente proporcional a la caída de presión e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido.

En el siguiente capítulo se presentará la influencia de plástico reciclado, así como la reología del polímero con el que se operará el extrusor.

CAPITULO 4 RECICLADO DE PLASTICOS Y SU CARACTERIZACION REOLOGICA

4.1 RECICLADO DE PLASTICO

No hay evidencia de cuando empezó el reciclado del plástico; pero un posible comienzo dentro de la industria tuvo lugar en los primeros procesos de fabricación de termoplásticos sintéticos; fue rápidamente el aprendizaje de las partes y evolucionar la fabricación de operaciones fueron innumerables los avances en tecnología de materiales.

Esto también fue determinante que cierto porcentaje de estos materiales podrían ser recuperados y reprocesados con material virgen, moldeándose aceptablemente. Este proceso puede ser repetido por algún número de veces de acuerdo a la degradación del material.

La industria de los plásticos creció dentro de los años de 1900s, grandes cantidades de desperdicios plásticos, dieron inicio a la existencia de nuevos procesos de fabricación.

Productores de resina comenzaron a generar grandes cantidades de desperdicio de material de sus operaciones de trabajo manufacturado. Mezcladores, convertidores, empaques, y distribuidores también comenzaron a generar desperdicio de material. Leidner [22] da tabulaciones de datos de desperdicio de material generado por varios sectores de la industria desde 1978, 1980 y la proyección hacia el año 2000.

Una complicada teoría: el sistema del flotador fue inventado para separar cinco componentes mezclados de baja densidad de polietileno (LDPE), HDPE, PP, PS y PVC. se dirigieron los experimentos del Laboratorio disponible - ordena plásticos en tanques en reposo que contienen una solución de agua-sal, y dos agua -alcohol. Un esquema de el sistema de flotación se da en figura 4.1 [33].

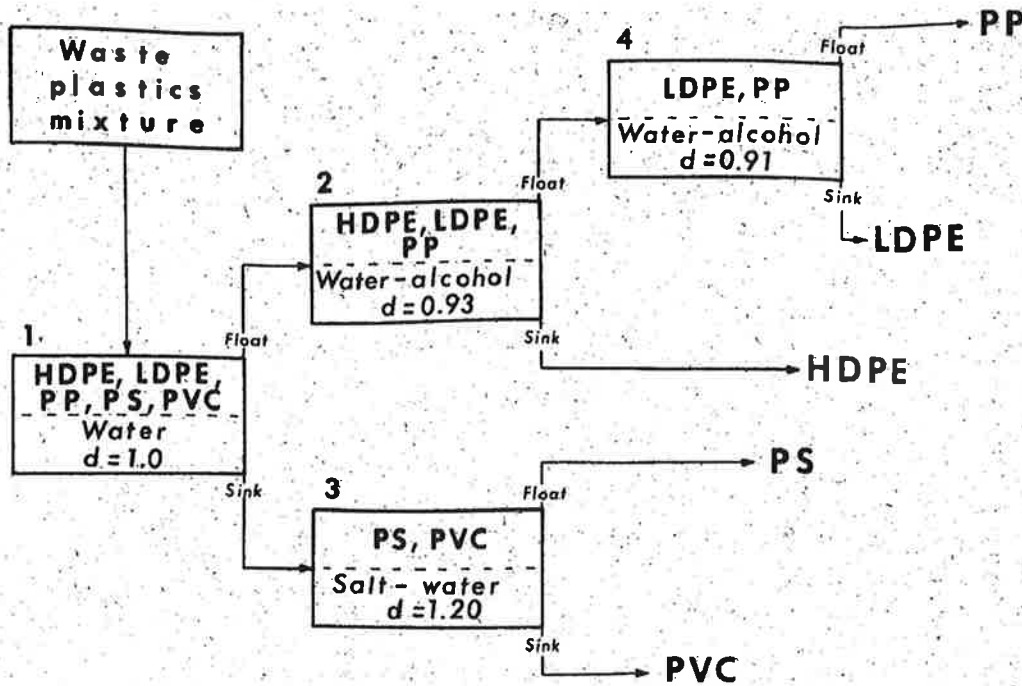


Figura 4.1 Pasos teóricos del esquema de separación de mezclas de desechos plásticos.

Otras actividades de reciclado de los años setenta eran más pequeñas en el tamaño pero no en importancia de desarrollo de tecnología. Por ejemplo, la Compañía de Lechería de Flecha Dorada (San Diego, CA) probablemente fue la primera compañía con un programa reciclando en HDPE reuniera botellas. La compañía empezó a coleccionar las botellas en 1970 mientras entregaban leche a las casas particulares. Las botellas se devolvieron a la planta, granulado, lavado, y secó; dicha resina fué molida y vendida a fabricantes para la producción de desagüe agrícola.

4.2 Poliolefinas

Las poliolefinas son producidos por la polimerización de pequeñas moléculas llamada α -olefinas [1,2], α -olefinas son los que poseen hidrocarburos alifáticos una sola atadura doble entre los primero y segundos átomos del carbono y teniendo la fórmula química general C_nH_{2n} . Los ejemplos de normalmente usó un - los olefinas incluyen el etileno ($CH_2=CH_2$), Propileno ($CH_3-CH=CH_2$), y butano ($CH_3-CH_2-CH=CH_2$). Las Poliolefinas que se producen más comercialmente son el polietileno (PE) y polipropileno (PP). PE y PP

serán las únicas poliolefinas discutidas en este capítulo. Poliolefinas son los miembros de la clase de materiales llamados el termoplásticos, mientras significando que estos materiales pueden fundirse o resblandecerse a temperaturas elevadas y amoldar ó formar repetidamente en las nuevas formas [3]. A través de este capítulo, término " procesado" se aplicará a operaciones de manufactura para fundir y formar poliolefinas para producir los artículos útiles. Las propiedades mecánicas y físicas y las características procesado de poliolefinas son principalmente dependientes en el medio peso molecular, la distribución de pesos moleculares, y el número y longitud de " ramas" de las moléculas del polímero. Las condiciones de la polimerización, los catalizadores e iniciadores, y co - monomeros todos ligados fuertemente a la influencia de las características del polímero.

4.3 POLIETILENO (PE).

El PE es obtenido por la polimerización del etileno: si la reacción de polimerización se lleva a cabo bajo el proceso de baja presión, el producto obtenido es lineal y altamente, cristalino, por lo cual su densidad es también alta. Al contrario, si el proceso se lleva a cabo a alta presión se fomenta la aparición de ramificaciones en la cadena principal del compuesto, con lo que se obtiene una densidad menor y también un menor grado de cristalinidad.

Se considera que un PE es de baja densidad (BD), cuando dicho valor oscila entre $0.92 - 0.94 \text{ gr/cm}^3$ aproximadamente y su grado de cristalinidad se encuentra entre 50-60 %.

Comercialmente puede encontrarse en el mercado, tipos especiales (modificados) de PE, como pueden ser: PE de ultraalto peso molecular, que proporciona mejores resistencias mecánica, térmica. etc., PE entrecruzable, que a través de la adición de peróxidos y durante el moldeo puede convertirse en material termofijo; PE clorado, que presenta la característica de autoextinción.

El aumento en el grado de cristalinidad provoca un mejoramiento en las propiedades mecánicas como son resistencia a la tensión, a la torsión. a la tracción, aumentan la dureza, la tenacidad, pero se disminuyen la flexibilidad y la transparencia

El rango de temperaturas de fusión para las diferentes PE se encuentra entre 105 y 135 °C, lo cual representa temperaturas bajas que no lo hacen adecuado para la esterilización.

Las propiedades eléctricas del PE son excelentes, muy cercanas a las del teflón.

El PE es químicamente inerte a todos los solventes químicos hasta temperaturas cercanos a los 100°C, por encima de esta temperatura es atacado por benceno y ácido nítrico. Es atacado también por las radiaciones ultravioleta (UV) y prácticamente no acepta aditivos.

4.4 MATERIALES MAS COMUNES EN EL MOLDEO

4.4.1 CONDICIONES APROXIMADAS DEMOLDEO PARA LOS PRINCIPALES TERMOPLASTICOS

4.4.1.1 POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PE).

Estructura: Semicristalina

Densidad: $P=0.91 - 0.94 \text{ gr/cm}^3$

Contracción de moldeo: 1 - 3 %

Contracción de post-moldeo: 0.6 - 1.2

Temperatura de moldeo (°C):

Molde	Boquilla	Zona de homog.	Zona de comp.	Zona de alim.
30-50	170-200	180-210	170-200	150-180

Presión de inyección: 500 - 1 000 bar

Presión de sostenimiento: 250 - 500 bar

Contrapresión: 50 - 100 bar

Se utilizan boquilla abierta y válvula de no retorno.

Durante interrupciones en la producción de duración considerable deben reducirse las temperaturas en el cilindro.

Al término de la producción no es necesario purgar el cilindro.

4.4.1.2 POLIETILENO ALTA DENSIDAD (PE)

Estructura: Semicristalina

Densidad: $P = 0.95 - 0.98 \text{ gr/cm}^3$

Contracción de moldeo: 1.5 - 4 %

Contracción de post-moldeo: 0.6 - 1.2%

Temperaturas de moldeo (°C):

Molde	Boquilla	Zona de homog.	Zona de comp.	Zona de alim.
30-50	210-240	220-250	210-240	190-200

Presión de inyección: 800 - 1 200 bar

Presión de sostenimiento: 400 - 600 bar

Contrapresión: 80 - 120

Se utilizan boquilla abierta y válvula de no retorna.

Durante interrupciones en la producción de duración considerable deben reducirse las temperaturas en el cilindro.

Al término de la producción no es necesario purgar el cilindro.

4.5 MODELO REOLOGICO DEL PLASTICO

4.5.1 Introducción.

La medición de las propiedades reológicas es muy importante por diversas razones. El conocimiento de estas propiedades permite una simulación más aproximada a la realidad de un sistema que maneja polímeros, sobre todo que esto es importante ya que algunas características físicas del producto final dependen fuertemente de las propiedades reológicas.

Actualmente, los reómetros son capaces de caracterizar las propiedades reológicas de un polímero, y se pueden clasificar en las siguientes categorías: De cono y plato, cilindros concéntricos, platos paralelos y los de tubo capilar. Debido al amplio campo de aplicación para la rapidez de corte ($\dot{\gamma}$), los esfuerzos de corte (τ) y la relativa facilidad para definir estos parámetros como función de la temperatura, los tubos capilares se usan ampliamente en el campo del procesamiento de polímeros.

En la norma **ASTM 3835-96 Standard Test Method for Determination of Properties of Polymeric Materials by Means of a Capillary Rheometer** se describe el método para la determinación de propiedades de materiales poliméricos por medio de un reómetro capilar continuo; es descrito, sus componentes y el dimensionamiento de los dados capilares utilizados en la caracterización de las curvas reológicas ($\dot{\gamma}$ y τ como funciones de la temperatura) de un polietileno (PE) reciclado, un termoplástico utilizado en la fabricación de poliducto, tapas etc., y que es además el material de trabajo que se utilizó en las simulaciones del modelo por elemento finito de este trabajo.

En la norma **ASTM 1238-98 Standard Test Method for Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer** se describe el método para la determinación de propiedades de materiales poliméricos por medio de un plastometro; así como, un esquema que relaciona sus componentes y el dimensionamiento de los dados capilares utilizados en la determinación del Índice de fluidez de un polietileno (PE) reciclado; termoplástico utilizado en la fabricación de poliducto, tapas etc., y que es además el material de trabajo que se utilizó en las simulaciones del modelo por elemento finito de este trabajo.

El flujo laminar de fluidos newtonianos en capilares bajo condiciones isotérmicas está definido por la ecuación de Hagen-Poiseuille [20]. Esta ecuación presenta las relaciones de esfuerzo de corte y la rapidez de corte en la pared del capilar.

Los esfuerzos de corte en la pared del capilar son:

$$\tau_p = \frac{D \cdot \Delta P}{4L} \quad (4.1)$$

La rapidez de corte en la pared es:

$$\dot{\gamma}_p = \frac{32 \cdot q_v}{\pi D^3} \quad (4.2)$$

La viscosidad resulta:

$$\mu = \frac{\tau_p}{\dot{\gamma}_p} \quad (4.3)$$

Donde D y L son el diámetro y la longitud del capilar, q, es el flujo volumétrico y ΔP es la caída de presión a través del dado.

Cuando se trabaja con fluidos no-newtonianos, como lo son los termoplásticos, las ecuaciones anteriores deben corregirse [20], (CORRECCION DE RABINOWITSCH) y entonces, de la ecuación (4.3) se podrá calcular la viscosidad verdadera. Además, los parámetros calculados dependen del tipo de capilar (dimensiones, D y L), sin embargo, Bagley [20], desarrolló un método empírico (CORRECCION DE BAGLEY para determinar la independencia de cualquier capilar).

A continuación se describen los métodos de corrección antes mencionados:

4.5.2 CORRECCION DE BAGLEY [20].

Este método sugiere que la curva de flujo es independiente de la relación (L/D) del viscosímetro, pero el procedimiento requiere la consideración de cero deslizamiento en las paredes del capilar y la independencia del tiempo del fluido. En este método se agrega una longitud ficticia de capilar $N_f R$, tal que la medición total de ΔP para el flujo completamente desarrollado se presenta en $(L+N_f R)$. Si las consideraciones anteriores se cumplen, entonces τ_p es una función única de $4q_v / \pi R^3$ en flujo laminar tal que:

$$\tau_p = \frac{R}{2} \left[\frac{\Delta P}{L + N_f R} \right] = F \left[\frac{4q_v}{\pi R^3} \right] \quad (4.4)$$

De aquí:

$$\frac{L}{R} = -N_f + \frac{\Delta P}{2F \left(4q_v \frac{1}{\pi R^3} \right)} \quad (4.5)$$

Se llevan a cabo una serie de medidas de ΔP con diferentes L/D contra de capilar, con $4q_v / \pi R^3$ constante. Una gráfica de L/D contra ΔP será entonces lineal y la intersección sobre la ordenada L/R en ΔP igual a cero dará $-N_f$. Una gráfica no lineal sugiere la presencia de efectos de deslizamiento y dependencia del tiempo.

4.5.3 CORRECCION DE RABINOWITSCH [20].

La relación (4.2) es válida solamente si la viscosidad del fluido es constante, esto es, si los esfuerzos de corte son directamente proporcionales a la rapidez de corte. El método presenta una ecuación que relaciona la rapidez de corte verdadera en la pared del canal de flujo y la rapidez de corte calculada para la consideración de flujo newtoniano para flujo laminar a través de canales cilíndricos. Esta ecuación muestra que es independiente de la forma de las relaciones entre el esfuerzo de corte y la rapidez de corte:

$$\dot{\gamma}_v = \dot{\gamma}_p \left[\frac{3n+1}{4n} \right] \quad (4.6)$$

Donde, $\dot{\gamma}_v$ es la rapidez de corte verdadera y n es el índice de comportamiento del fluido. Cabe mencionar que n es un parámetro experimental y su valor varía desde 0.2 a 0.7 para termoplásticos, siendo el valor de 1 (caso NEWTONIANO) su límite máximo. Este parámetro n representa la pendiente en una curva logarítmica entre el esfuerzo de corte verdadero (CORREGIDO) y la rapidez de corte newtoniana ($d \log \tau, / d \log \dot{\gamma}_p$).

4.6 MODELOS REOLOGICOS

La densidad y la viscosidad son propiedades del material importantes en los problemas de dinámica de fluidos. Ambas se combinan para definir el número de Reynolds, Re [21]:

$$\text{Re} = \frac{\rho LU}{\mu} \quad (4.7)$$

donde L es una característica de longitud y U una característica de la velocidad de flujo.

Los termoplásticos son polímeros cuya viscosidad depende fuertemente de la rapidez de corte y de la temperatura. Estos materiales cuya viscosidad varía con la rapidez de corte son llamados NO NEWTONIANOS.

4.6.1 CASO NO-NEWTONIANO-ISOTERMICO.

La relación constitutiva correspondiente a la LEY DE POTENCIAS y que no depende de la temperatura, se define por:

$$\tau_{ij} = \mu_0 D^{n-1} d_{ij} \quad (4.8)$$

donde, τ_{ij} es el tensor de esfuerzos deviatorio, $d_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$ es el tensor de la rapidez de corte (deformación), μ_0 es la viscosidad de referencia ($\gamma'_0 = 1$), n es el índice de comportamiento del fluido (varía de 0.2 a 0.7 para materiales pseudoplásticos), $D^2 = 1/2 d_{ij}d_{ij}$

La ecuación (4.8) permite la definición de la viscosidad efectiva, y:

$$\mu = \mu_0 D^{n-1} \quad (4.9)$$

El modelo de la ley de potencias puede formularse para incluir un valor de corte o

referencia para D , definido como D_0 , tal que:

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 D_0^{n-1} & D < D_0 \\ \mu_0 D^{n-1} & D \geq D_0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Los valores de μ_0 , n y D_0 son datos que se requieren en las simulaciones del caso NO NEWTONIANO-ISOTERMICO.

Esta metodología se utiliza en el capítulo 6 al aplicar las propiedades a cada elemento en el mallado del modelo representado en el paquete computacional ANSYS.

4.7 METODOLOGIA PARA LA OBTENCION DE LAS CURVAS REOLOGICAS.

Uno de los parámetros más importantes en las simulaciones, es la viscosidad como función de la temperatura. Para obtener estas relaciones se llevó a cabo la Reología Capilar del PE de los materiales más utilizados en la planta Plásticos para Embalaje S.A. de C.V. en Querétaro, Qro., esta experimentación se realizó con el extrusor de laboratorio del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) y analizando los resultados por el paquete computacional elaborado por personal del propio CIQA con que cuenta el mismo equipo. Así, el objetivo es obtener las curvas de viscosidad como función de la rapidez de corte y temperatura (Intervalo: 185 °C - 195 °C). Cabe señalar que los resultados de este paquete fueron corregidos por pérdidas a la entrada del capilar (CORRECCION DE BAGLEY) y por la naturaleza no-newtoniana del plástico (CORRECCION DE RABINOWITSH).

El paquete computacional para reología capilar de este equipo realiza a grandes pasos, lo siguiente:

1. Registra la temperatura del plástico fundido que pasa por la cabeza capilar.
2. Registra la presión a la entrada del capilar del material que se está bombeando del extrusor.
3. El paquete accesa los datos de las pruebas y promedia las lecturas de presión, calcula la caída de presión, rapidez de corte, esfuerzo de corte y viscosidad. Los resultados pueden ser impresos en forma tabular.

El procedimiento para obtener las curvas de viscosidad es el siguiente:

- 1) Montar el tornillo estándar de extrusión al sistema.
- 2) Colocar firmemente la cabeza capilar, la cual debe contener uno de los dados capilares.
- 3) Colocar el transductor de presión y termopar de temperatura en la cabeza capilar.
- 4) Realizar todas las conexiones al sistema de control.
- 5) Verificar que el transductor de presión funcione correctamente.
- 6) Definir el perfil de temperatura del extrusor (según el material a caracterizar) y la cabeza (primera temperatura para la curva de viscosidad).
- 7) Cargar el material y purgar hasta que las condiciones se establezcan (de 15 a 30 minutos).
- 8) Asignar al extrusor la velocidad de rotación más baja (10 rpm) y mantenerla durante 10 minutos.
- 9) Pesar la muestra de plástico durante un minuto para la velocidad asignada.

- 10) Llevar a cabo los puntos 8 y 9, en pasos de 10 rpm hasta llegar a 80 rpm.
- 11) Grabar el archivo de la prueba.
- 12) Colocar el (los) capilar (es) restante (s) y realizar el mismo procedimiento.
- 13) Se deberá llevar a cabo el mismo procedimiento para las demás temperaturas que se fijen en la cabeza.
- 14) Correr el programa "CIDESI" y leer los datos de la prueba realizada.
- 15) Introducir los datos de las muestras pesadas (gr/min) para cada velocidad de prueba.
- 16) El programa presentará los resultados de los esfuerzos de corte, Ec. (4.1), y la rapidez de corte (Ec. 4.2) en la pared para cada velocidad de prueba.
- 17) Realizar la corrección de Bagley para obtener Nf , Ec. (4.5).
- 18) Calcular el esfuerzo de corte verdadero para cada velocidad de prueba, Ec. (4.4).
- 19) Realizar una gráfica logarítmica entre el esfuerzo de corte verdadero (ORDENADA) y la rapidez de corte (ABCISA). La pendiente de esta curva representa el valor del índice de comportamiento del fluido, n , Ec. (4.6).
- 20) Calcular la rapidez de corte verdadera, Ec. (4.6).
- 21) Calcular la viscosidad verdadera, relación entre τ_v y γ'_v
- 22) Realizar una gráfica logarítmica entre la viscosidad verdadera y la rapidez de corte.
- 23) Realizar los puntos 14 a 22 para las otras temperaturas.

Caracterización del PE (Temperaturas 185 °C y 195 °C)

Los parámetros considerados son:

- A) Tomillo estándar, paso = diámetro = 0.01905 m (3/4 in), profundidad en la zona de entrega = 0.002 m.
- B) Datos capilares 15:1 y 40:1, con $D = 0.00127\text{m}$ (0.050in).
- C) Transductor de presión 0 - 10000 psi, presión de calibración = 8000 psi.
- D) Perfil de temperatura en la recámara de la extrusora, Z.1, 175 °C, Z.2, 185 °C, Z3, 185 °C y en la cabeza, 185 °C (Primera curva).

Después de realizar los primeros nueve puntos de la metodología, los resultados del gasto másico (gr/min) de las muestras se presentan en tabla 4.

Tabla 4. Gasto másico medido . Ver anexo A

Se introducen los datos del peso (capilar $L/D = 31.1$) en el programa "CIDESI", tabla 4.1-4.7, ver anexo A

obteniéndose los resultados del esfuerzo de corte en la pared y la rapidez de corte en la pared; estos se presentan en la tabla 4.1-4.7, ver anexo A.

No se lleva a cabo la corrección de Bagley, por contar con un solo capilar. Cabe señalar que para la determinación de las rectas es necesario considerar al menos dos capilares; suficientes para suponer la independencia de las curvas reológicas de cualquier capilar, realizando la gráfica de relación de capilar (L/D)-caída de presión.

Los valores de la rapidez de corte, , se presentan en la tabla 4.1-4.7 (quinta columna).

La viscosidad verdadera, relación de las columnas segunda y tercera, se muestra en la tabla 4.1-4.7 (séptima columna).

El procedimiento anterior se lleva para la temperatura de 190 °C, obteniéndose las curvas finales presentadas en anexo A.

4.7.1 INDICE DE COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO, n :

De la Reología Capilar, se obtuvieron las curvas de la tabla 4, para el dado capilar $L/D = 31.1$ a una temperatura de 190 °C. El índice n es igual a la magnitud de la tangente de las curvas de aproximación en la gráfica logarítmica; razón de corte $(1/s)\delta$ viscosidad (poises). Obteniendo un valor promedio 0.8

En este capítulo se llevo a cabo, la reología de los polímeros con los que el dispositivo de extrusión operará, dando como resultado el comportamiento del fluido para cada muestra presentada.

En el capítulo siguiente se desarrollará la manufactura del dado, definiendo el material, recubrimiento, tratamiento térmico.

CAPITULO 5 MANUFACTURA DEL DISPOSITIVO DE EXTRUSION

El desgaste de los dados se presenta particularmente sobre las áreas de contacto a través del dado. El factor tiempo en el desgaste de todos los dados, depende de muchos factores más. Algunos de los factores que afectan el desgaste son:

1. Alineamiento entre flujo, recámara
2. Diseño del dado
3. Uniformidad del calentamiento de la recámara
4. Material de proceso.
5. Agentes abrasivos y pigmentos
6. Material de la superficie del dado
7. Soporte impropio de la recámara
8. Cargas excesivas en el extremo de descarga de la recámara.
9. Corrosión generada por la degradación del polímero.
10. Corrosión generada por aditivos.

Se muestra a continuación un estudio de los diferentes recubrimientos y la selección del material empleado en la manufactura del dado.

5.1 RECUBRIMIENTOS

5.1.1 CROMO

Los dados son frecuentemente cromados en el área de contacto con el polímero. Este recubrimiento tiene grandes beneficios, los cuales son:

1. Los dados son más fáciles de limpiar después de que son removidos de la recámara
2. Existe una mejora considerable en la resistencia al desgaste en la raíz cuando se corren materiales abrasivos.
3. Ayuda al polímero a fluir con menos fricción

El recubrimiento de cromo se aplica usualmente en espesores de 0.00075 in-0.001in

5.1.2 NIQUEL

En algunos casos tiene mejor resistencia a la corrosión que el cromo. El Níquel es más suave y tiene mayor resistencia al desgaste. El Níquel electrodepositado, como el cromo, dado un depósito puro de Níquel. Esta deposición da una aleación de níquel hasta un 15% de Fósforo. La ventaja de la deposición es la obtención de un espesor más uniforme y la capacidad para obtener una dureza mayor por tratamiento térmico. La desventaja es que los costos son mayores y gran dificultad para aplicar recubrimientos grandes. En la tabla 5.1, se muestra una comparación de dureza para diferentes materiales.

TABLA 5.1 COMPARACION DE DUREZA

MATERIAL	DUREZA BRINELL
Hierro	75 - 375
Níquel	60 - 410
Cobalto	75 - 390
Cromo	400 -1000

Tabla 5.1. Comparación de dureza.

5.2 DUREZA SUPERFICIAL.

Frecuentemente se protegen con aleaciones resistentes al desgaste, soldadas sobre la superficie. Las aleaciones más comunes son Stellite y Colmonoy. Estos materiales contienen varios metales de carburo en una matriz de Cobalto o Níquel. Los materiales de las superficies desgastadas Stellite son base Cobalto y los materiales de Colmonoy tienen base Níquel. Los materiales mas comunes usados para dureza superficial de los dados se listan en la tabla 5.2 . Estos materiales pueden ser aplicados por las técnicas de soldadura: TIG (electrodo de Tungsteno con gas inerte, TIG por las siglas en ingles de Tungsten Inert Gas), arco de plasma y oxiacetileno.

El espesor de la dureza superficial es normalmente de 1/16 in. Estos materiales son altamente resistentes a la corrosión debido a la base de Níquel ó Cobalto.

TABLA 5.2 MATERIALES COMUNES PARA ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

PRODUCTO	MATERIAL BASE	DUREZA Rc	% CARBON	TENDENCIA CRACKING	% CROMO	% TUGSTENO	% BORO	COSTO \$ POR lb
STELLITE No.1	COBALTO	48-54	2.5	4	30	12		30-100
STELLITE No.6	COBALTO	37-42	1.1	3	28	4		30-100
STELLITE No.12	COBALTO	41-47	1.4	3	29	8		30-100
COLMOLOY No.4	NIQUEL	36-40	0.45	3	10		2	8_20
COLMOLOY No.6	NIQUEL	45-50	0.65	3	11.5		2.6	8_20
COLMOLOY No.66	NIQUEL	50-55	0.7	4	12.5		2.7	8_20
COLMOLOY No.6	NIQUEL	56-61	0.75	5	13.5		3	8_20
COLMOLOY No.74	NIQUEL	40-45	0.48	3	10.4	4	2.1	8_20
COLMOLOY No.84	NIQUEL	40-45	1.2	3	29	8	1.8	8_20

5.3. TRATAMIENTOS TERMICOS.

5.3.1. ENDURECIMIENTO POR FLAMA.

Este método es probablemente el más viejo y todavía el más común que se utiliza para incrementar la resistencia al desgaste de los filetes. El acero AISI 4140 generalmente es suministrado por el fabricante de tornillos bajo la condición de "tratado térmicamente" recocido.

Normalmente esta condición es de 28 - 32 Rc (269 -321 BW la cual da buena resistencia mecánica, alrededor de 100,000 psi de esfuerzo de cedencia, ver tabla A3 . Los dados pueden ser endurecidos aún mas por flama, hasta alrededor de 48 - 55 Rc. Naturalmente, esto no puede realizarse para acero al bajo carbón. Aproximadamente se requiere 0.04% de carbón para alcanzar esta dureza sobre bases prácticas. El proceso emplea una flama de gas/oxigeno , seguido de enfriamiento rápido. La profundidad normal de la dureza es de alrededor de 1/8 in.

5.3.2 ENDURECIMIENTO POR INDUCCION.

Este proceso generalmente da los mismos resultados que el de flama, pero utiliza calor inducido creado por flujos magnéticos en lugar de flama.

5.3.3 NITRADO

Se puede obtener un recubrimiento exterior muy duro, sometiendo al dado a una atmósfera alta de nitrógeno a altas temperaturas. La temperatura es alrededor de 950 F.

Esta temperatura da una distorsión mínima y una resistencia superficial alta, alrededor de 60 -70 Rc. La profundidad del recubrimiento es de aproximadamente 0.020-0.024 in. La dureza tan alta que se presenta se debe a la formación de nitruros metálicos. Un acero nitrado adecuadamente como un 135 o un Nitraloy 135M puede usarse con la confianza de que responderán con su máxima dureza. Estos materiales son similares al AISI 4140 en su composición química, pero tienen de 0.95%-1.30% de Aluminio para formar nitruros de Aluminio muy duros. El 4140 también puede ser nitrado, esto le daría una dureza ligeramente inferior pero aumenta ligeramente la profundidad del recubrimiento. El nitrado

se realiza sobre las áreas de contacto con el polímero en el dado al ser extruido. Esto da una mejora en la resistencia al desgaste. La resistencia a la corrosión en tornillos y dados nitrados es pobre. Se recomienda que los tornillos sean nitrados en un horno vertical para disminuir la distorsión.

5.3.4 CARBURIZADO.

El carburizado de tornillos involucra la adición de Carbón a la superficie de aceros al bajo y medio Carbón seguido de un endurecimiento superficial tal como el de FLAMA o INDUCCION. El acero se calienta de 1400-1450 °F en presencia de un material que contiene Carbón tal como el propano, butano o sales de Sodio. La principal desventaja de este proceso es que se requieren altas temperaturas lo cual puede causar distorsión y cambios en sus propiedades del tratamiento térmico, aunque se obtiene durezas superficiales altas, ver tabla A3.

5.3.5 TRATAMIENTOS ESPECIALES.

Existen diversos tratamientos especiales para los materiales de los tornillos y dados. El Hastelloy C-276 puede incrementar su esfuerzo de cedencia a la tensión de 50,000 psi a 80,000 psi por Reducción en Frío. El Duraniquel 301 es endurecido para mejorar sus propiedades mecánicas. Lo anterior involucro un calentamiento hasta 1 100 °F para después, someterse a un enfriamiento suave. Los aceros inoxidable 17-4PH y 15-5PH son tratados en una solución y endurecidos por precipitación. Los aceros grado herramienta son endurecidos para obtener las propiedades mostradas en la tabla 5.3, pero tienen la desventaja de alta distorsión en el tratamiento, esto combinado con la dificultad para obtener rectitud.

TABLA 5.3

MATERIALES COMUNES UTILIZADOS EN DADOS DE EXTRUSIÓN

	ESFUERZO DE CEDENCIA A LA TENSION Psi	DUREZA DE MAQUINADO Rockwell	DUREZA DEL ENTRENAMIENTO Rockwell	RESISTENCIA AL DESGASTE EXTERIOR	RESISTENCIA AL DESGASTE RAIZ	RESISTENCIA A LA CORROSION	PERFORMANCIA DEL MATERIAL	FACILIDAD DE MAQUINADO	COSTO POR LIBRA \$
ACEROS ALEADOS									
AISI 4140	10000	28-32 Rc	48-55 Rc	REGULAR	POBRE	POBRE	EXCELENTE	REGULAR	0.75
AISI 4340	110000	28-32 Rc	48-55 Rc	REGULAR	POBRE	POBRE	REGULAR	REGULAR	0.78
AISI 8620	65000	90 Ra	65 Rc	POBRE	REGULAR	POBRE	EXCELENTE	EXCELENTE	0.65
NITRALLOY 135M	85000	33 Rc	60-70 Rc	BUENA	BUENA	POBRE	POBRE	REGULAR	1.5
ACERO INOXIDABLE									
304	35000	80 Ra	90 Ra	POBRE	POBRE	BUENA	BUENA	REG.-POBRE	1.6
316	35000	95 Ra	95 Ra	POBRE	POBRE	BUENA	BUENA	REG.-POBRE	2
416	115000	30 Rc	30 Rc	POBRE	POBRE	REG-BUENA	POBRE	REG.-POBRE	1.5
17-4PH	175000	38 Rc	42 Rc	POBRE	REG-POBRE	BUENA	REGULAR	REG.-POBRE	2
15-5PH	175000	38 Rc	42 Rc	POBRE	REG-POBRE	BUENA	POBRE	REG.-POBRE	2
ACEROS ESPECIALES									
DURANICKEL 301	125000	30-38 Rc	32 Rc	POBRE	POBRE	EXCELENTE	MUY POBRE	POBRE	12
HASTELLOY C276	80000	86 Ra	86 Ra	POBRE	POBRE	EXCELENTE	MUY POBRE	POBRE	35
ACEROS HERRAMIENTA									
D-2	300000	96 Ra	58-60 Rc	BUENA	BUENA	POBRE	BUENA	REGULAR	2
H-13	300000	96 Ra	50-60 Rc	BUENA	BUENA	POBRE	BUENA	REGULAR	1.5

5.4 TOLERANCIAS EN LA MANUFACTURA DE LOS DADOS [14]

En la tabla 5.4 se presentan las tolerancias típicas principales en la manufactura de dados de extrusión.

Tabla 5.4. Tolerancias en la manufactura de dados.

Longitud Total:	+/- 1/16'	Longitud en recámara	1/4"
Zonas de transición:	+/- 1/10 DIA		
Diámetro Exterior: TOLERANCIA	+/- 0.001"		

CONCENTRICIDAD

Agujero de recámara: 0.015"

DUREZA

Material Base 4140:	25-32 Rc	COLMONOY No. 4:	32-35 Rc
Filetes endurecidos por Flama:	48 Rc min.	COLMONOY No. 5:	36-40 Rc
NITRALLOY 135M(o equivalente):	60-70 Rc	COLMONOY No. 56:	38-42 Rc
STELLITE No. 6:	34-36 Rc	COLMONOY No. 6:	40-44 Rc
STELLITE No. 12:	38-42 Rc	COLMONOY No.74:	34-38 Rc

ACABADOS

DADOS no recubiertos	16 RMS max
DADOS recubiertos : RAIZ	8 RMS max
LADOS EXTERIORES, D.E.:	16 RMS max

5.5 DISEÑO DEL DADO.

El dibujo de ensamble del dado extrusor se muestran a continuación figura 5.1

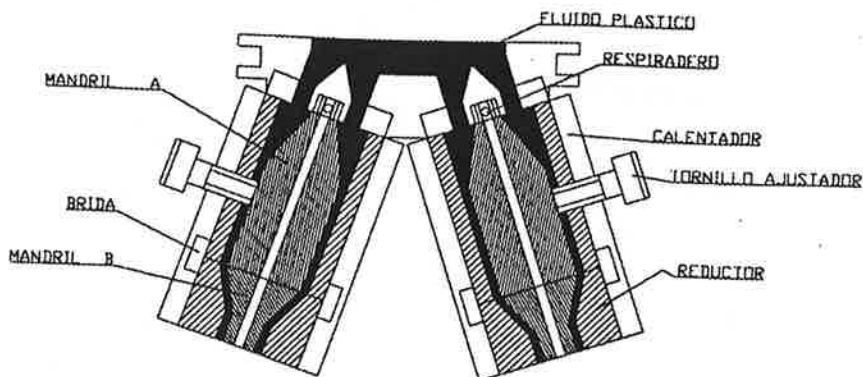


Figura 5.1. Dado conformador con dos salidas para obtener poliducto.

El material escogido por ser comercial es el acero AISI 4140 recocido surtido por Aceros Fortuna S.A. de C.V. en la ciudad de Querétaro, se ha hecho un tratamiento térmico alcanzando una dureza superficial de 54 Rc y posteriormente, Nitrurado (especificado en la sección 5.4.3)

Acabados 8 Rms max,

Tolerancias de maquila ± 0.001 pulgadas

5.6 CALENTADORES

El cálculo del calentador es desarrollado en el capítulo 6; dicho calentador es colocado en cada una de las camisas de salida que es correspondiente a la zona de entrega del dado. Se determinó habiendo conocido la transferencia de calor de 638 watts sobre de la camisa.

Se aplica un factor de 2 a consideración del fabricante para obtener margen de operación dado que una resistencia (calentador) fluctúa su comportamiento. La resistencia más próxima es de 1500 w de composición cerámica en dicha área de contacto.

Fue suministrada por la empresa Watlow garantizando su funcionamiento. la figura 5.1 muestra la colocación de la resistencia sobre la camisa.



Figura 5.1 Calentadores cerámicos colocados sobre dado de extrusion .

En este capítulo se muestra la manufactura del dado y la selección de componentes eléctricos para su calentamiento. En el siguiente capítulo se hará referencia a la transferencia de calor en estado permanente de una de las salidas del dado correspondientes a la zona de entrega, además se desarrollará analíticamente la determinación del coeficiente convectivo para esta zona que interactúa con el polietileno. Siendo dato importante para el análisis numérico de dicha zona, y de esta manera se desarrollara la determinación de la distribución de temperatura de una camisa de salida del dado del extrusor.

CAPITULO 6 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION EN ESTADO PERMANENTE

Existe una gran variedad de problemas de conducción en estado estable en donde la transferencia de calor se lleva a cabo en más de una dimensión.

Existen en general varias técnicas o métodos de solución para resolver un problema de conducción en estado no transitorio en donde la temperatura es función de dos y hasta tres coordenadas. Usualmente estos métodos de solución se clasifican en: *Analíticos*, *Númericos*, *Gráficos* y *Analógicos*. Dentro de esta clasificación, los métodos numéricos son los de más amplia aplicación cuando se tienen geometrías o condiciones de frontera irregulares, dados los procesos sorprendentes en la computación digital [24]. En este trabajo nos enfocaremos a la solución numérica por medio de MEF, una breve descripción y los pasos a seguir se muestran a continuación:

6.1 MEF

Hoy en día se cuenta con computadoras cada vez más veloces, el método del elemento finito (MEF) se presenta como el más utilizado en la simulación del proceso de extrusión [3],[6],[7],[8] y [10]. Existen varios programas comerciales que se pueden utilizar en la simulación de este proceso. El uso del paquete simplifica la simulación y su solución pero no asegura que los resultados obtenidos sean reales, particularmente cuando el campo no es muy conocido. Se debe usar un programa comercial sólo cuando el campo físico es bien conocido por el usuario, cuando se conoce el fenómeno físico y el método numérico que se use. Los resultados obtenidos son válidos sólo si se pueden verificar experimentalmente o cuando se les puede comparar con resultados conocidos. La ventaja del uso del MEF es la más fácil y rápida repetición de los cálculos para variar los parámetros y conocer su influencia en el proceso, lo que en la vida industrial es muy importante debido al factor tiempo.

El objetivo de esta investigación es el de dominar el proceso de extrusión en la cabeza o dado del extrusor desde el punto de vista numérico, obteniendo las principales relaciones entre los parámetros operativos y geométricos y del material termoplástico que afectan al perfil de presión y la calidad del producto extruido. Se llevará a cabo el mallado y solución por elemento finito del dado de la sección de entrega y de la cabeza de extrusión, además se realizará la validación experimental del modelo numérico con la finalidad de que los resultados obtenidos puedan ser aplicados al proceso de extrusión a nivel industrial.

6.2 SOLUCION DE LA ECUACION DIFERENCIAL

Considere la variación de temperatura en un cilindro compuesto consistiendo en dos capas coaxiales en perfecto contacto térmico (ver figura 6.1), el calor de disipación desde un alambre (con dos aislamientos) llevando una corriente eléctrica y un flujo de calor cruzando un espesor de pared compuesta circular, un tubo cilíndrico son típicos ejemplos. La temperatura T es una función de la coordenada radial r . La variación de T con respecto a r es, en general no uniforme. Nosotros deseamos determinar una aproximación $T_e(r)$ a $T(r)$ sobre el grosor del cilindro. La solución exacta es determinada por la solución de la ecuación diferencial:

$$-\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rk \frac{dT}{dr} \right) = q(r) \quad (6.1)$$

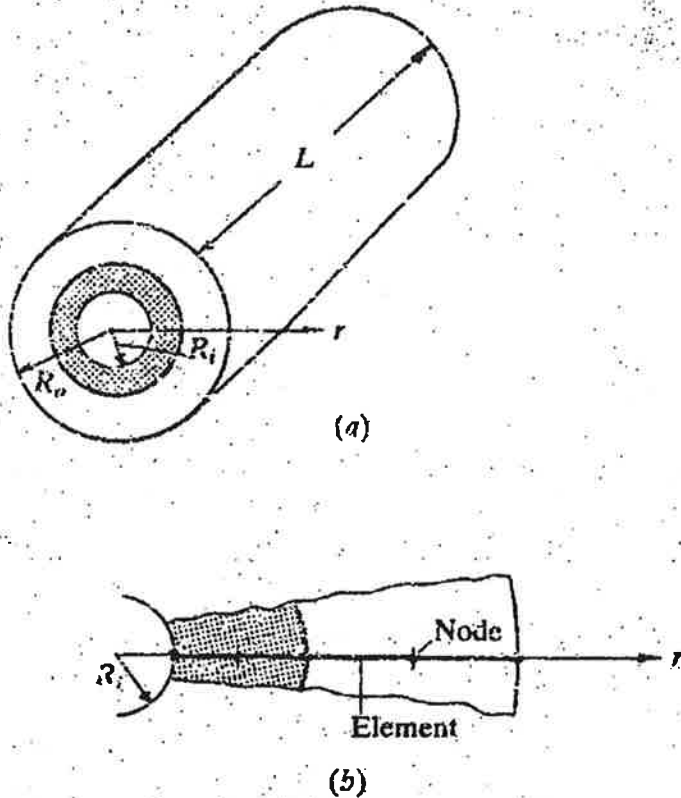


Figura 6.1 (a) Cilindro coaxial compuesto, hecho de dos diferentes materiales. (b) Representación del elemento finito de una línea radial de el cilindro.

Sujeto a condiciones de frontera apropiadas, por ejemplo , aislamiento en $r = R_i$ y sujeto a una temperatura en T_o en $r = R_o$:

$$kr \frac{dT}{dr} = 0 \text{ en } r = R_i; \quad T(r) = T_o \text{ en } r = R_o \quad (6.2)$$

Donde k es la conductividad térmica, la cual varía de capa en capa, R_i y R_o son el interior y el exterior de el cilindro, y q es el rango medio de energía generado. Note que la temperatura es independiente de las coordenadas circunferenciales, (por causa de la geometría axisimétrica, condiciones de frontera y cargas), y tiene la misma variación a lo largo de cualquier línea radial.

Cuando es difícil obtener una solución exacta del problema, por causa de la compleja geometría y las propiedades del material o porque $q(r)$ es una función complicada que hace que la evaluación de la integral no sea exacta, nosotros buscamos una aproximación. En el método de elemento finito, el dominio (R_i, R_o) es dividido entre N subintervalos, y la solución aproximada se busca en la forma:

$$T_1(r) = \sum_{j=1}^n T_j^1 \varphi_j^1(r) \quad (R_i \leq r \leq R_i + h_1; \text{ primer intervalo})$$

$$T_2(r) = \sum_{j=1}^n T_j^2 \varphi_j^2(r) \quad (R_i + h_1 \leq r \leq R_i + h_1 + h_2; \text{ segundo intervalo}) \quad (6.3)$$

$$T_N(r) = \sum_{j=1}^n T_j^N \varphi_j^N(r) \quad (R_i + h_1 + \dots + h_{N-1} \leq r \leq R_o; N \text{ intervalo}) \quad (6.4)$$

Donde h_e denota la longitud del intervalo e ésimo, T_j^e es el valor de la temperatura $T_e(r)$ en el j ésimo punto geométrico del e ésimo intervalo, y $\varphi_j^e(r)$ son polinomios sobre el e ésimo intervalo. La función continua $T(r)$ se aproxima en cada intervalo por un grado polinomial deseado, y el polinomio se expresa en términos de los valores de la función en un número selecto de puntos en el intervalo. El número de puntos es igual a el número de parámetros en el polinomio. Por ejemplo, una aproximación de 1 polinomio lineal de la temperatura sobre el intervalo requiere dos valores, y por lo tanto dos puntos son identificados en el intervalo. Los puntos finales de 1 intervalo son seleccionados para este propósito porque en dos puntos también define la longitud del intervalo. (ver figura 6.1 a).

Por aproximación de alto orden polinomial, adicionandole puntos son identificados en el interior del intervalo (ver figura 6.1 b). Los intervalos son llamados elementos finitos, los puntos usados expresados en la aproximación polinomial de la función son llamados nodos.

T_j^e son llamados valores nodales, y $\varphi_j^e(r)$ son llamadas funciones aproximadas de elementos finitos. Los T_j^e son determinas de tal manera que $T_e(r)$ satisface la ecuación diferencial (6.1) y condiciones de frontera (6.2) en algún sentido, usualmente, la ecuación diferencial es satisfecha en un sentido de peso integral, y las condiciones de frontera sobre la misma función son exactamente satisfecha.

La aproximación del elemento muestra de la solución permite a nosotros incluir cualquier dato discontinuo, tal como propiedades de material y algunos mallados de muy bajo orden o un mallado de poco alto orden presenta elementos de largos gradientes de la solución.

La satisfacción de la ecuación diferencial en un pesado sentido integral gobierna para problemas de estado estable, a las relaciones algebraicas entre temperaturas nodales T_j^e y calor Q_j^e del elemento. Las ecuaciones algebraicas de todos los elementos son ensamblados tal que la temperatura es continua y el calor es balanceado en nodos comunes a elementos.

La ecuación ensamblada son resueltas por valores nodales después imponiendo las condiciones de frontera del problema.

6.3 SISTEMAS AXISIMETRICOS

Para una transferencia de calor simétrica respecto del eje z (por ejemplo, independiente de la coordenada circunferencial) el gobierno de la ecuación esta dado por

$$-\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = f(r, z) \quad (6.5)$$

donde r es la coordenada radial y z la coordenada axial. El vector gradiente de temperatura esta definido por :

$$q = r \left(k_r \frac{\partial T}{\partial r} \hat{i} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \hat{j} \right)$$

y la derivada normal de T (ejemplo, el flujo del calor es negativo) a través de la superficie es

$$q_n = r \left(k_r \frac{\partial T}{\partial r} n_r + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) \quad (6.6)$$

donde n_r y n_z son los cosenos directores de la normal unitaria \hat{n} ,

$$\hat{n} = n_r \hat{i} + n_z \hat{j}$$

La forma débil esta dada por:

$$\begin{aligned}
 0 &= 2\pi \int_{\Omega^e} w \left(- \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] - f \right) r dr dz \\
 &= 2\pi \int_{\Omega^e} \left(k_r \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + k_z \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - wf \right) r dr dz - 2\pi \int_{\Gamma^e} w q_n ds
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

donde los factores de 2π viene de la integración con respecto de la coordenada circunferencial sobre $(0, 2\pi)$, y q_n es dado por (6.6). La condición de frontera convectiva es de la forma:

$$q_n + r\beta(T - T_\infty) = \bar{q}_n$$

sustituyendo por $q_n = -r\beta(T - T_\infty) + \bar{q}_n$, nosotros obtenemos:

$$0 = 2\pi \int_{\Omega^e} \left(k_r \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + k_z \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - wf \right) r dr dz - 2\pi \int_{\Gamma^e} w [-r\beta(T - T_\infty) + \bar{q}_n] ds \tag{6.8}$$

El modelo de elemento finito de esta ecuación es:

$$[K^e + H^e] \{T^e\} = \{f^e\} + \{P^e\} + \{Q^e\} \tag{6.9}$$

Donde

$$\begin{aligned}
 K_{ij}^e &= 2\pi \int_{\Omega^e} \left(k_r \frac{\partial \varphi_i^j}{\partial r} \frac{\partial \varphi_j^e}{\partial r} + k_z \frac{\partial \varphi_i^e}{\partial z} \frac{\partial \varphi_j^e}{\partial z} \right) r dr dz \\
 H_{ij}^e &= 2\pi \int_{\Gamma^e} \beta^e \varphi_i^e \varphi_j^e r ds \\
 f_i^e &= 2\pi \int_{\Omega^e} \varphi_i^e f r dr dz
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

$$Q_i^e = 2\pi \oint_{\Gamma^e} \bar{q}_n \varphi_i^e ds$$

$$P_i^e = 2\pi \oint_{\Gamma^e} \beta^e T_\infty^e \varphi_i^e r ds$$

Los modelos son válidos para la transferencia de calor conductiva y convectiva en condiciones de frontera. La transferencia de calor radiativa son no lineales por consiguiente no son consideradas, las contribuciones convectivas $[H^e]$ y $\{P^e\}$ a los coeficientes de los elementos son omitidos.

6.4 SOLUCION DE PROBLEMAS CONTINUOS

La solución de problemas continuos por el método de elemento finito (MEF) sigue un proceso ordenado. En seguida se describen en términos generales los pasos usados de este proceso.

6.4.1 Discretización del continuo

El dominio total es dividido en subdominios simples llamados elementos, (Ver figura 7.3). En problemas de dos dimensiones el dominio total es dividido en triángulos o paralelogramos de lados rectos, o bien triángulos o cuadriláteros de lados curvos. Con elementos de lados rectos, se puede lograr una aproximación del dominio con una discretización fina; sin embargo, con elementos de lados curvos la aproximación del dominio es mejor. En problemas de tres dimensiones el dominio se discretiza con elementos de forma de tetrahedros, cubos o elementos con superficies curvas. Algunos de estos elementos se muestran en la figura 6.2.

6.4.2 Funciones de forma.

Para cada elemento se selecciona una aproximación de la función buscada. La función buscada puede ser la distribución de temperatura en problemas de transferencia del calor, o bien, el campo de desplazamientos en elasticidad. Para problemas unidimensionales las funciones de forma $N^e(x)$ son polinomios de primero, segundo o tercer orden.

Para problemas de dos dimensiones, las funciones de forma $N^e(x,y)$ son polinomios lineales, cuadráticos o de mayor orden. La función por aproximar $u(x,y)$, (por ejemplo la

distribución de temperatura en una región dada) puede expresarse a través de las variables nodales del elemento mediante una combinación lineal de las funciones de forma con las variables nodales como coeficientes. Si sólo los valores de la función en los nodos, $u_i^{(e)}$, son tomados como variables, la aproximación para el elemento bidimensional e con n nodos tiene la forma:

$$u^{(e)}(x, y) = \sum_{i=1}^n u_i^{(e)} N_i^{(e)}(x, y) \quad (6.11)$$

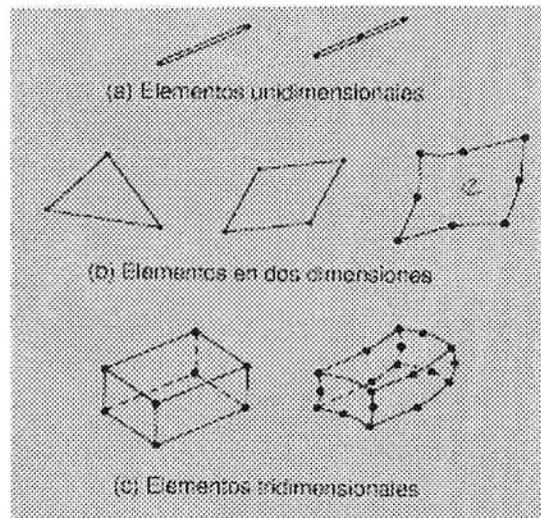


Figura 6.2 Algunos tipos comunes de elementos.

6.4.3 ENSAMBLE Y SOLUCION

El MEF trabaja con la formulación variacional del problema, esto es, una expresión matemáticamente equivalente a la ecuación diferencial que gobierna el problema. Sustituyendo la ecuación (7.10) en la formulación variacional obtenemos un sistema lineal de ecuaciones de la forma:

$$[K^e] \{u^e\} = \{b^e\}$$

para el elemento e .

Considerando la contribución de cada uno de los elementos en que se ha dividido el dominio original se obtiene el sistema global de ecuaciones:

$$[K]\{u\} = \{b\} \quad (6.12)$$

Donde $[K]$ es llamada matriz de rigidez y $\{b\}$ es el vector de fuerzas; el vector de incógnitas $\{u\}$ son las variables nodales y contienen el valor de la función en los nodales.

Una vez aplicadas las condiciones de frontera podemos resolver la ecuación (6.12) para obtener la solución aproximada de $u(x, y)$ en los puntos nodales [12].

Por lo que en el presente trabajo nos referiremos principalmente al método numérico, ya que la simulación se realizará con la ayuda del software *ANSYS* de elementos finitos.

6.5 MODELACIÓN DE ANSYS

En resumen, en el método del elemento finito, un dominio dado se divide entre subdominios, llamados elementos finitos, y una solución aproximada a el problema es desarrollado sobre cada uno de estos. La subdivisión de un conjunto en partes tiene dos ventajas:

- 1.- Esto permite una exacta representación de las geometrías complejas e incluso de materiales no uniformes.
- 2.- Una representación suficientemente exacta de la solución dentro de cada elemento, saca fuera efectos locales por ejemplo largos gradientes de solución.

El tercer paso fundamental del método del elemento finito que son ilustrados por medio de ejemplos son:

- 1.- Divide el entero en partes(ambos a representar la geometría y solución del problema).

- 2.- Sobre cada parte, busque una aproximación a la solución como una combinación lineal de valores nodales y funciones de aproximación.
- 3.- Derive las relaciones algebraicas entre los valores nodales de la solución sobre cada parte, y ensamble las partes a obtener la solución del entero.

A pesar de los pasos arriba presentados una idea básica del método del elemento finito, hay muchas otras formas que otros presentan, una de ellas es la siguiente:

- 1.- Puede ser discretizar el dominio, dependiendo de la forma que este presente, dentro del mallado exista más de un tipo de elemento. Por ejemplo, en la aproximación de un dominio irregular, uno puede usar una combinación de rectángulos y triángulos.
- 2.- Si se utiliza más de un tipo de elemento en la representación del dominio, uno de cada tipo debe ser aislado y estas ecuaciones desarrolladas para el correspondiente enlazamiento del continuo.
- 3.- El gobierno de las ecuaciones son generalmente complejos. Son usualmente ecuaciones diferenciales. En la mayoría de los casos, las ecuaciones no pueden ser resueltas sobre un elemento por dos razones. Primero, las ecuaciones no permitan la solución exacta, Es ahí que lo métodos variacionales entran en juego. Segundo las ecuaciones discretas obtenidas de métodos variacionales no pueden ser resueltas independientemente de los elementos restantes, por causa del ensamble de los elementos en cuestión, es necesario asegurar continuidad, limites y condiciones de frontera.
- 4.- Hay dos principales diferencias en la forma de la solución aproximada usada en el método del elemento finito y que es utilizado en métodos variacionales clásicos.(ejemplos métodos variacionales aplicados a un dominio entero). Primero en lugar de representar la solución u como una combinación lineal ($u = \sum_j c_j \phi_j$) en términos de parámetros arbitrarios c_j como en métodos variacionales, en la solución del método

del elemento finito, frecuentemente se representa como una combinación lineal ($u = \sum_j u_j \phi_j$) en términos de los valores u_j de u (y posiblemente es derivada como buena) en los puntos nodales. Segundo, las funciones aproximadas en el método de el elemento finito, frecuentemente polinomiales que son derivadas usando teoría de interpolación. Por consiguiente, el método de elemento finito no es restrictivo al uso de aproximaciones que son combinaciones lineales de valores nodales u_j y funciones interpolación ϕ_j que son polinomios algebraicos. Uno puede utilizar además valores nodales como en el método de Raleigh –Ritz para representar la aproximación de la función.

- 5.- El número y la localización de los nodos en un elemento dependen sobre (a) la geometría de el elemento, (b) el grado de la aproximación polinomial y (c) la forma de integrar las ecuaciones. Por representar la solución requerida en términos de sus valores en sus nodos, uno obtiene directamente la solución aproximada en sus nodos.
- 6.- El ensamble de los elementos, en general el caso se baso sobre la idea de que la solución (y posiblemente es derivada por alto orden de las ecuaciones) es la continuidad entre fronteras de elementos.
- 7.- En general, el ensamble de elementos finitos esta sujeto a fronteras y condiciones iniciales. La ecuación discreta asociada con el elemento finito mallado son resueltas solamente después de que las condiciones iniciales o de frontera has sido impuestas.
- 8.- Hay tres razones de error en la solución del elemento finito: (a) esto a causa de la aproximación del dominio (este camino el error que presenta en el primero de dos ejemplos); (b) esto a causa de la aproximación de la solución; y (c) esto a causa de computación numérica (ejemplo integración numérica y redondeo de errores en la computadora. La estimación de errores en general, no es un problema simple . Por consiguiente debajo de ciertas condiciones, pueden ser estimadas para un elemento dado y problema.

9.- La exactitud y convergencia de la solución del elemento finito depende de la ecuación diferencial, esto es en forma integral, y el elemento usado. "Exactitud" es referido a la diferencia entre la solución exacta y la solución del elemento finito, mientras "convergencia" refiere a la exactitud como el número de elementos en el mallado es incrementado.

10.- En problemas dependientes del tiempo, uno de dos formulaciones es la siguiente:

En el primer escenario, la ecuación diferencial son aproximadas por el método de elemento finito obteniendo un cambio de ecuaciones diferenciales en tiempo. En el segundo, la ecuación diferencial en tiempo es resuelta exactamente o mucho mas aproximada por otros métodos variacionales o métodos de diferencias finitas para obtener ecuaciones algebraicas, lo cual son resueltas por valores nodales.

En una simulación numérica de un proceso físico, nosotros empleamos un método numérico y una computadora para evaluar el modelo matemático del proceso. El método del elemento finito es una técnica muy poderosa ideada para evaluar los complejos procesos físicos. El método es caracterizado por los pasos siguientes:

- 1.- El dominio del problema se representa por una colección de subdominios simples, llamados elementos finitos. La colección de elementos finitos se nombra mallado del elemento finito.
- 2.- Sobre cada elemento finito, el proceso físico es aproximado por funciones de tipo deseado (polinomiales u de otras formas), y ecuaciones algebraicas relacionadas en cantidades físicas en puntos seleccionados, llamados nodos, del elemento desarrollado.
- 3.- Las ecuaciones de los elementos son ensambladas utilizando continuidad y/o balance de cantidades físicas.

En el método del elemento finito, en general, nosotros buscamos una solución aproximada u a una ecuación diferencial en la forma siguiente:

$$u \approx \sum_{j=1}^n u_j \varphi_j + \sum_{j=1}^m c_j \phi_j$$

6.6 DETERMINACION DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DE UNA CAMISA DE SALIDA DEL DADO DEL EXTRUSOR.

Se determina por la técnica analítica en un tubo anular el coeficiente de transferencia de calor por convección, tomando datos experimentales de reometría capilar del polietileno, material base del sistema de extrusión, figura 6.3.



Figura 6.3 Camisa de salida de dado para poliducto extruido.

Determinación del coeficiente convectivo promedio de transferencia de calor.

Fluye polietileno a razón de 70 kg/h a través de un tubo de 95.25 mm de diámetro interior, la pared del tubo se mantiene a una temperatura constante de 130°C.

1. Cálculo del coeficiente local de transferencia de calor a una distancia de 0.2 m de la entrada del tubo.
2. Cálculo del valor promedio del coeficiente de transferencia de calor entre $x=0$ y $x=0.2$ m. Si el polietileno entra al tubo con una temperatura uniforme de 110°C .
3. Determinación de la cantidad de calor transferida de la pared del tubo del polietileno a lo largo de los 0.2 m de longitud del tubo.

6.6.1 PROCEDIMIENTO DE SOLUCION.

OBJETIVO.

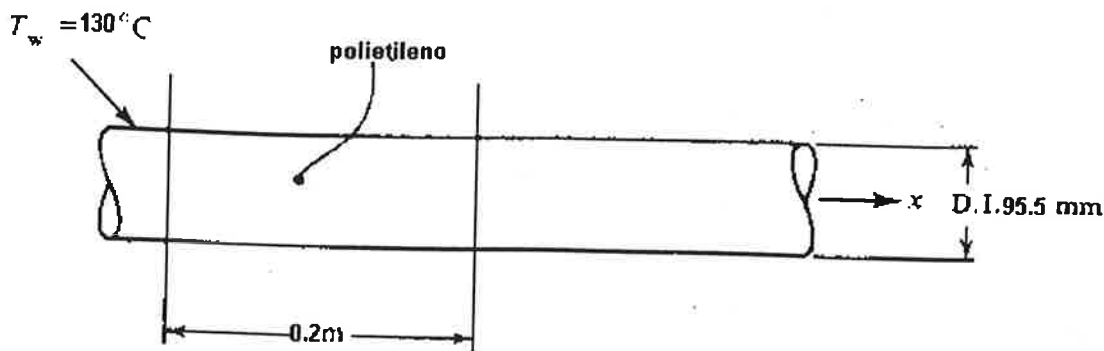
Determinar:

El coeficiente convectivo de transferencia de calor local h , en $x=0.2$ m.

El coeficiente convectivo promedio de transferencia de calor local h promedio entre $x=0$ y $x=0.2$ m.

La cantidad transferida de calor del tubo al polietileno Q , en el primer segmento a un punto 2 m del origen del tubo. figura 6.4.

El polietileno se encuentra inicialmente a una temperatura de inicio de 110°C ; fluye a razón de 70 kg / h. a través de un tubo que tiene en su pared una temperatura constante de 130°C , el diámetro del tubo es de 95.5 mm . en sección anular \emptyset interior 79.37mm.



Condiciones iniciales $x = 0$
 $T_{b,i} = 110^\circ\text{C}$

$x = L$
 $T_{b,l} = \text{ }^\circ\text{C}$

Figura 6.4 Camisa de salida de dado para poliducto extruido.

SUPOSICIONES:

Prevalcen condiciones de estado estacionario.

Se toman como propiedades del polietileno aquellas a la temperatura media entre la entrada y la pared y se tomarán como constantes.

Existe flujo laminar; esto se verificará en el análisis del proceso.

El perfil de la temperatura esta completamente desarrollado

SOLUCION [12]

El número de Nusselt se toma de la tabla 6.1 para lo cual se necesita conocer el valor de X^* , la distancia sin dimensiones a la entrada se define como:

$$x^* = \frac{\left(\frac{x}{r_w} \right)}{\text{Re} \cdot \text{Pr}}$$

donde

x = La distancia a la entrada.

r_w = el radio interno del tubo

Números de Nusselt laminares locales y promedios para un tubo circular con temperatura de pared constante

x^*	Nu	$Nu_{promedio}$
0.001	12.86	22.96
0.004	7.91	12.59
0.010	5.99	8.99
0.040	4.18	5.87
0.080	3.79	4.89
0.100	3.71	4.66
0.200	3.66	4.16
∞	3.66	3.66

Tabla 6.1 Números de Nusselt laminares locales y promedios para un tubo circular con temperatura de pared constante.

La temperatura inicial del fluido, en $x=0.2m$ se puede determinar utilizando la expresión:

$$(T_w - T_{x=0.2})(T_w - T_{x=0}) \exp\left[\frac{-h_{prom} \cdot A_x}{m \cdot C_p}\right]$$

Donde:

A_x = Area de superficie del tubo entre $x=0$ y $x=0.2$ en contacto con el fluido = $2\pi r_w L$

T_w = Temperatura de la pared.

$T_{x=0.2}$ =Temperatura en bulto en $x=0.2m$.

$T_{x=0}=T_{B,i}$ = Temperatura en bulto inicial.

m_c = Razón de masa de flujo del fluido.

PROPIEDADES.

El PE para la temperatura de $120^\circ C$, [18], tiene las siguientes propiedades:

$C_p = 0.90 \text{ cal/gr } ^\circ C$

$K = 0.26 \text{ Kcal/mh } ^\circ C$

$\rho = 0.92 \text{ gr/cm}^3$

6.6.2 ANALISIS.

1er. Paso Cálculo de la velocidad promedio del fluido sobre la superficie en contacto. Se puede calcular con la siguiente expresión:

u_{prom} = Razón de flujo volumétrico/ área transversal de la sección transversal del tubo por donde fluye el fluido, figura 6.5.

$$u_{prom} = \frac{\text{razón de flujo volumétrico}}{A}$$

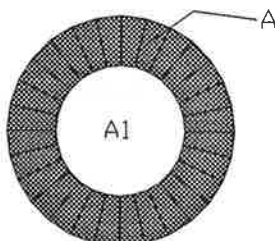


Figura 6.5 Área anular transversal de poliducto extruido.

Donde $A = A_1 - A_2$

$$A_1 = \left(\frac{\pi}{4}\right) D_1^2$$

$$A_2 = \left(\frac{\pi}{4}\right) D_2^2$$

siendo $D_1 = 0.095\text{m}$

$D_2 = 0.07937\text{m}$

$A_1 = 0.007088\text{m}^2$

$$A_2 = 0.004947 \text{ m}^2$$

$$A = 0.007088 \text{ m}^2 - 0.004947 \text{ m}^2 = 0.00214 \text{ m}^2$$

Razón de flujo volumétrico

$$\text{Gasto en masa} = 70 \text{ kg/min} = 1116.66 \text{ gr/s}$$

$$\text{Razón de flujo volumétrico} = \text{gasto en masa} / \rho$$

$$\text{Razón de flujo volumétrico} = 1268 \text{ cm}^3/\text{s} = 1268 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$u_{prom} = 1268 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} / 0.00214 \text{ m}^2 = 0.5925 \text{ m/s}$$

2do. Paso. Determinación de radio hidráulico

$$R_h = \frac{\text{Volúmen disponible para el flujo}}{\text{superficie mojada total}}$$

V = Volumen disponible para el flujo

Teniendo el área de la sección transversal anular calculado dentro del primer paso:

$$A = 0.00214 \text{ m}^2$$

$$L = 0.212 \text{ m}$$

$$V = A * L = (0.00214 \text{ m}^2) (0.212 \text{ m}) = 0.0004537 \text{ m}^3$$

Superficie mojada total

Se obtiene la longitud de circunferencia correspondiente a cada diámetro a su vez es multiplicado por su longitud, haciendo la sumatoria de las superficies desarrolladas.

De los datos utilizados en paso 1 y 2

Siendo

$$D_1 = 0.095 \text{ m}$$

$$D_2 = 0.07937 \text{ m}$$

$$L=0.212\text{m}$$

$$P_1=\pi D_1 = \pi (0.095\text{m}) =0.298\text{m}$$

$$P_2=\pi D_2 = \pi (0.07937\text{m}) =0.249\text{m}$$

$$\text{Superficie 1} = P_1L=0.298\text{m} \times 0.212\text{m} = 0.063\text{m}^2$$

$$\text{Superficie 2} = P_2L=0.249\text{m} \times 0.212\text{m} = 0.053\text{m}^2$$

$$S= \text{superficie 1} + \text{superficie 2} = 0.063\text{m}^2 + 0.053\text{m}^2 = 0.116 \text{m}^2$$

Por lo tanto:

$$R_h = 0.0004537\text{m}^3 / 0.116 \text{m}^2 = 0.0039 \text{m}$$

$$D_h = R_h \times 2 = 0.0039 \text{m} \times 2 = 0.0078 \text{m}$$

Determinación de la viscosidad cinemática ν

Tomando un datos experimentales en la producción de poliducto

70 kg de producción de poliducto de $\phi_m = 0.0078\text{m}$ equivalente a un rollo de 100 m de longitud es realizado como producto final en 80 minutos.

Obteniendo su superficie de contacto exterior desarrollada tenemos:

$$100 \times \pi \times D_m = 100 \times \pi \times 0.0078\text{m} = 2.45 \text{m}^2$$

$$80 \text{min} = 4800 \text{s}$$

por lo tanto:

$$2.45 \text{m}^2 / 4800 \text{s} = 5.1 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$$

3er Paso. Determinación del numero de Reynolds

$$Re = \frac{u_{prom} \cdot D_h}{\nu}$$

$$Re = 0.5925 \text{ m/s} (0.0078\text{m}) / 5.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 9.05$$

9.05 < 2300 por lo tanto es flujo laminar.

4º. Paso. Determinación del número de Prandtl

$$Pr = \frac{C_p \rho v}{k} = \frac{0.90 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \text{ } ^\circ\text{C}} \cdot 0.92 \times 10^{-6} \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} \cdot 5.1 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{7.22 \times 10^{-2} \frac{\text{cal}}{\text{s m} \text{ } ^\circ\text{C}}}$$

$$Pr = 5.84 \times 10^9$$

$$x^* = \frac{x/r_w}{Re Pr}$$

siendo

$$r_w = \text{radio hidráulico} = 0.0039 \text{ m}$$

$x = 0.2\text{m}$ distancia a la que se requiere calcular h local

$$Re = \text{Número de Reynolds} = 9.05$$

$$Pr = \text{Número de Prandtl} = 5.84 \times 10^9$$

$$x^* = \frac{0.2\text{m} / 0.0039\text{m}}{(9.05) \cdot (5.84 \times 10^9)} = 970.29 \times 10^6$$

Obteniendo el número de Nusselt de la tabla 7.2 por medio de x^*

$$Nu = 3.66$$

Por lo tanto el coeficiente convectivo promedio de transferencia de calor se define con la expresión siguiente:

$$h = Nu \frac{k}{D} = 3.66 \left(\frac{0.30239}{0.0078} \right) = 141.89 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Para el cálculo de Q necesitamos conocer $T_x=0.2$

conociendo

$$m = 1.16 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Ax = 2\pi r_w L = \pi DL = \pi(0.078\text{m})(0.2\text{m}) = 4.9 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$C_p = 0.90 \text{ cal/gr}^\circ\text{k} \rightarrow 3768 \text{ j/kg}^\circ\text{k}$$

$$h_{\text{prom}} = 141.89 \text{ w/m}^2\text{k}$$

sustituyendo:

$$(130 - T_{x=0.2}) = (130 - 110) \exp\left[\frac{-141.89 \cdot 4.9 \times 10^{-3}}{1.16 \times 3768}\right]$$

$$(130 - T_{x=0.2}) = 1$$

por lo tanto:

$$(T_{x=0.2}) = 129^\circ\text{c}$$

La razón de transferencia de calor de los primeros 0.2m

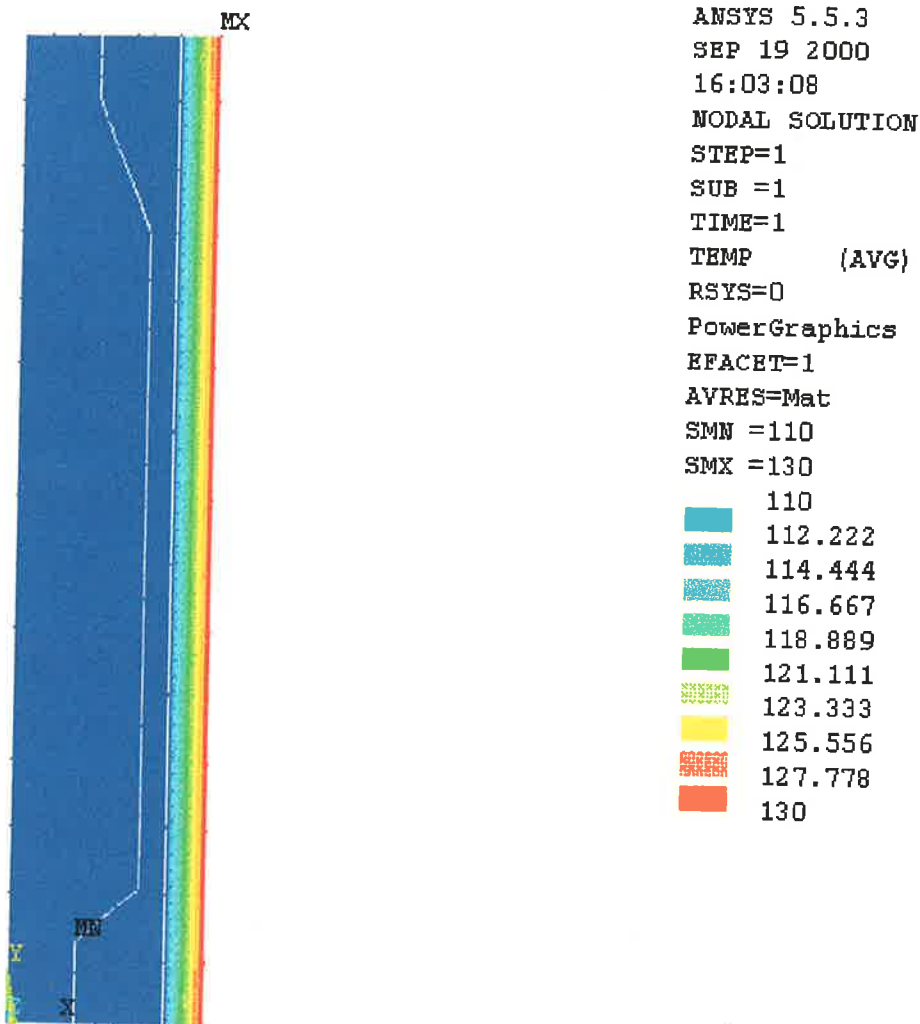
$$Q = C_p \rho (\text{razón de flujo volumétrico}) (T_{x=0.2} - T_{x=0}) = 920(3768)(10 \times 10^{-6})(19) = 658.6464 \text{ watts}$$

6.7 DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN UNA CAMISA DE SALIDA DEL DADO EN ESTADO PERMANENTE POR METODO DE SOLUCION DE ELEMENTO FINITO (MEF)

Se realizan los pasos mostrados en la sección 6.5, dando como resultado de la selección un elemento PLANE55 2-D THERMAL SOLID [12] que puede utilizarse en opciones de 3 y 4 cuatro nodos, así mismo puede usarse como elemento plano o axisimétrico definido en el keyoption 3.

Las propiedades del material de la camisa y el coeficiente convectivo de transferencia de calor transmitido por el polietileno se determinaron en la sección 6.5 para la simulación en ANSYS y determinar la distribución de temperatura .

El proceso de introducción de datos para la generación del modelo y su solución son mostrados en anexo b.



MODELO AXISIMETRICO

La solución generada, aplicando solución nodal nos muestra la distribución de temperatura en un estado permanente con cargas de temperatura y convección fijas para el instante en que el pirómetro de control registra una temperatura de 130°C, resultando una temperatura sobre el material del expansor de 110°C.

La conclusión de esta observación es la conservación de la temperatura en un instante que la superficie tiene 130°C en dirección a su centro, así mismo la conservación de temperatura del polietileno. A esto habría que considerar el flujo de polietileno en el dado, la presión generada en la frontera del dado con la entrega del husillo.

En este capítulo se demostró la distribución de temperatura homogénea del polímero a lo largo de la camisa, conservando la temperatura de 112°C , que es la temperatura ideal para la fabricación de poliducto, conservando sus propiedades en el trayecto de la zona de entrega.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se obtuvieron los requerimientos y necesidades propuestos por la empresa Plásticos para Embalaje S.A. de C.V. dentro del desarrollo del dispositivo de extrusión con doble salida para fabricación de poliducto, usando material reciclado. Se describen a continuación en los siguientes puntos:

- ◆ Reducción del tiempo para uniformizar la temperatura de plastificación dentro del dado extrusor y así acceder al comienzo del proceso.
- ◆ Reducción de desperdicio de material al comienzo de la operación, después de uniformizar la temperatura de trabajo.
- ◆ Conservación de temperatura en el dado del extrusor por medio de control de pirómetros y sensores de temperatura.
- ◆ Plastificar la materia prima reciclada sin variación de temperatura.
- ◆ Trabajo del extrusor al 90% de capacidad.
- ◆ Capacidad de extrusión de distintos diámetros de poliducto.
- ◆ Capacidad de adaptación de dispositivos secundarios para fabricación de perfiles.
- ◆ Calidad aceptable del producto final.
- ◆ Operación de 16 hrs continuas diariamente.
- ◆ Facilidad para el mantenimiento y limpieza.
- ◆ Cumplir con normas internacionales referentes a ruido no mayor de 70 decibeles.
- ◆ Cumplir con normas internacionales para el extruido de poliducto.

Comentarios

Al tener la presión de operación y temperatura correcta para la homogeneización del material virgen con el material reciclado en el barril, se obtiene como resultado una disminución en el consumo de energía eléctrica, además de tener la opción de extruir dos geometrías diferentes al mismo tiempo, las cuales están condicionadas a la velocidad de flujo y al enfriamiento adecuado (perfil, tubo).

Una ventaja del proyecto es la de extruir material con un aumento de la velocidad de salida de flujo másico, como resultado de haber elevado la presión de trabajo y la plastificación del material homogéneo en porcentajes de material reciclado compatible, logrando el punto exacto de fluidez sin tener una degradación significativa del material utilizado.

Además se logra el balance del gasto de material simultáneo en caso de tener diferente geometría a la salida del dado, variando únicamente el proceso de enfriamiento de acuerdo a la sección transversal de perfil conformado.

Finalmente se puede decir que los resultados de este trabajo ayudarán a la metodología de diseño y construcción de dados múltiples alimentados por un solo extrusor, aportando además la verificación del comportamiento termofluido del material dentro de este tipo de dados.

Por otro lado la utilización de material reciclado controlado de 1 o 2 procesos es útil, desde el punto de vista, que el material reciclado disminuye la contaminación ambiental, generación de depositos, manejo del mismo. Teniendo un valor agregado para este tipo de producto (poliducto), con el que se puede cumplir con las normas establecidas, para la fabricación de poliducto, ya sea conducto de agua , conducto para alojamiento de cables;adicionando aditivos, se podría fabricar conducto para gas, siempre y cuando se garantice su reproceso de la materia prima.

APENDICE A1

Ecuación de movimiento en coordenadas rectangulares (x, y, z).

En función de σ :

componente x
$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (A)$$

componente y
$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} - \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad (B)$$

componente z
$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z}$$

$$-\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\right) + \rho g_x \quad (C)$$

En función de los gradientes de velocidad para un fluido newtoniano de ρ y η constantes:

$$\begin{aligned} \text{componente } x \quad \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} \\ + \eta \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (D) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{componente } y \quad \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} \\ + \eta \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (E) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{componente } z \quad \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} \\ + \eta \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (F) \end{aligned}$$

APENDICE A2

TABLA 3.1. Relación entre el ángulo y algunas funciones trigonométricas, como $\text{sen } \theta$ y $\text{cos } \theta$

θ	$\text{sen } \theta$	$\text{cos } \theta$	$\text{sen}^2 \theta$	$\text{sen } \theta \text{ cos } \theta$
0	0	1	0	0
10	.1737	.9848	.0302	.1710
20	.3420	.9337	.1170	.3214
30	.5000	.8660	.2500	.4330
40	.6428	.7660	.4132	.4924
45	.7071	.7071	.5000	.5000
50	.7660	.6428	.5868	.4924
60	.8660	.5000	.7500	.4330

NOTA: El valor de $\text{sen}^2 \theta$ aumenta al aumentar θ ; y el valor de $\text{sen } \theta \text{ cos } \theta$ lo hace al aumentar en el intervalo de 0 a 45°. En la práctica, el ángulo θ varía comúnmente entre 15 y 30°.

Tabla 3.2 Variación de parámetros sustituidos en ecuación 3.27

D1.	H1	ANGULO	L1	N1	AP	n1	Q
5	0.5	17	30	100	200	10000	1666
8	0.5	17	30	100	200	10000	3520
8	0.8	17	30	100	200	10000	468
8	0.8	25	30	100	200	10000	1194
8	0.8	25	30	150	200	10000	2028
8	0.8	25	30	150	300	10000	886
8	0.8	25	30	150	300	50000	1613

TABLA 3.3 Densidad de algunos plásticos en estado fundido [g/cm^3]

ABS	Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno	1.00
POM	Polioximetileno (acetal)	1.16
PAN	Poliacrilonitrilo	1.03
CA	Acetato de celulosa	1.04
LDPE	Polietileno baja densidad	0.76
PA	Poliámidas (nylons)	0.98
UPVC	Policloruro de vinilo rígido	1.27
PC	Policarbonato	1.18
PET	PolietilenoTereftalato	1.21
pp	Polipropileno	0.72
PS	Poliestireno	1.00

TABLA 3.4 Ecuación característica del dado

Tipo de conducto	Newtoniano	Ley de la potencia
circular	$Q = \frac{\pi R^4}{8L} \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)$	$Q = \frac{4n}{3n+1} \frac{\pi R^3}{4} \left(\frac{R \Delta P}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}}$
rectangular	$Q = \frac{wH^3}{12L} \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)$	$Q = \frac{3n}{2n+1} \frac{wH^2}{6} \left(\frac{H \Delta P}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}}$
anular	$Q = B_2 \left(B_1 + \frac{B_2}{\ln K} \right) \frac{\pi}{8L} \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)$	

donde:

$$B_1 = R^2(1 - K^2) = (\text{radio ext.})^2 - (\text{radio int.})^2$$

$$B_2 = R^2(1 + K^2) = (\text{radio ext.})^2 + (\text{radio int.})^2$$

ANEXO A

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE MATERIALES POLIMERICOS POR MEDIO DE UN REOMETRO CAPILAR

POLIETILENO RECICLADO NORMA ASTM D 3835-93a

	COLOR	PRESENTACION	VELOCIDAD DE FLUIDO ESCALA CM/MIN	RELACION ESCALA VELOCIDAD KG	VELOCIDAD DE FLUIDO REAL CM/MIN	RANGO FUERZA ESCALA KG	% DE ESCALA FUERZA	FUERZA REAL KG
POLIETILENO-ANTIESTATICO		HOJUELA						
PRUEBA1			0.006	1-2	0.003	100	37	37
P2	NARANJA BLANCO		0.2	1-2	0.01	100	54	54
P3			0.6	1-2	0.3	100	80	80
P4			2	1-2	1	200	58	116
P5			6	1-2	3	200	77	154
P6			20	1-2	10	400	53	172

POLIETILENO-RECICLADO		HOJUELA						
PRUEBA1	AZUL		0.006	1-2	0.003	100	16	16
P2			0.2	1-2	0.01	100	22	22
P3			0.6	1-2	0.3	100	40	40
P4			2	1-2	1	100	66	66
P5			6	1-2	3	200	50	100
P6			20	1-2	10	200	82	164

POLIETILENO-RECICLADO		HOJUELA						
PRUEBA1	PINTO		0.006	1-2	0.003	100	12	12
P2			0.2	1-2	0.01	100	25	25
P3			0.6	1-2	0.3	100	32-50	32-50
P4			2	1-2	1	100	55-65	55-65
P5			6	1-2	3	200	45	90
P6			20	1-2	10	200	70	140

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE MATERIALES POLIMERICOS POR MEDIO DE UN REOMETRO CAPILAR

POLIETILENO RECICLADO NORMA ASTM D 3835-93a

	COLOR	PRESENTACION	VELOCIDAD DE FLUIDO ESCALA CM/MIN	RELACION ESCALA VELOCIDAD KG	VELOCIDAD DE FLUIDO REAL CM/MIN	RANGO FUERZA ESCALA KG	% DE ESCALA FUERZA	FUERZA REAL KG
POLIETILENO-BOLSA		GRUMO						
PRUEBA1	GRIS BLANCO		0.006	1-2	0.003	40	26	10.4
P2			0.2	1-2	0.01	40	32	12.8
P3			0.6	1-2	0.3	100	50	50
P4			2	1-2	1	100	79	79
P5			6	1-2	3	200	62	124
P6			20	1-2	10	400	49	196

POLIETILENO-RECICLADO		HOJUELA						
PRUEBA1	GRIS BLANCO		0.006	1-2	0.003	100	20	20
P2			0.2	1-2	0.01	100	38	38
P3			0.6	1-2	0.3	100	50	50
P4			2	1-2	1	200	43	86
P5			6	1-2	3	200	60	120
P6			20	1-2	10	400	41	164

DETERMINACIÓN DE RANGO DE FLUJO DE TERMOPLASTICOS POR UN PLASTOMETRO DE EXTRUSION

POLIETILENO RECICLADO NORMA ASTM D 1238-94a

MEDICION DEL INDICE DE FLUIDEZ

CONDICIONES TEMPERATURA SEGÚN LA NORMA 190° CON UN PESO 2.16 KG REGISTRADO EN gr/ 10 MINUTOS

IDENTIFICACION	PESOS						TIEMPO	PESO/ UNIDAD DE TIEMPO
	gr.							
	1	2	3	4	5	promedio	SEGUNDOS	gr/10 min
POLIETILENO- ANTIESTATICO	0.0632	0.063	0.0714	0.0635	0.0656	0.06534	90	0.435
PE AZUL	0.106	0.0933	0.0907	0.0918	0.0928	0.09495	10	5.697
PE PINTO	0.0411	0.0282	0.0384	0.0372	0.0347	0.03592	40	0.5388
POLIETILENO- BOLSA	0.073	0.0742	0.0759	0.0783	0.0835	0.07698	40	1.1547
PE HOJUELA	0.0429	0.0505	0.0484	0.0456	0.0504	0.04756	40	0.7134

TABLA 4.1		REOMETRIA CAPILAR				
	FORMULACIÓN.	MUESTRA No.1				
	TEMPERATURA.	190°C	L/D=31.1			
Pi =	3.14159265	Gasto 'Q' = $V \cdot A_p / 60$				
Ap = área del piston .cm2=	0.7125	Caída de presión en el capilar = $F \cdot 980000 / A_p$				
L=long. del capilar .cm =	1.55	Vel. de corte = $4 \cdot Q / \pi \cdot R^3$				
R=radio del capilar .cm =	0.025	Esf. de corte = $R \cdot DP_c / 2 \cdot L$				
R cubica =	1.5625E-05	Viscosidad = Esf. de corte/Vel. de corte				
VELOCIDAD	FUERZA	GASTO	CAIDA PRES	VEL. CORTE	ESF CORTE	VISCOSIDA D
CM/MIN	KG	CM3/SEG	DIAS/CM2	1/SEG	DINAS/CM2	POISES
0.060	45.25	0.00071250	62238596.5	58.0597232	501924.165	8644.96311
0.200	78.00	0.00237500	107284211	193.532411	865195.246	4470.54446
0.600	107.20	0.00712500	147447018	580.597232	1189088.85	2048.0443
2.000	166.50	0.02375000	229010526	1935.32411	1846859.08	954.289297
6.000	246.00	0.07125000	338357895	5805.97232	2728692.7	469.980315
20.000	385.00	0.23750000	529543860	19353.2411	4270515	220.661489

TABLA 4.1 REOMETRIA CAPILAR MUESTRA N° 1 A 190°C

TABLA 4.2		REOMETRIA CAPILAR				
	FORMULACIÓN.	MUESTRA No.1				
	TEMPERATURA.	210°C	L/D=31.1			
Pi =	3.14159265	Gasto 'Q' = $V \cdot A_p / 60$				
Ap = área del piston .cm2=	0.7125	Caída de presión en el capilar = $F \cdot 980000 / A_p$				
L=long. del capilar .cm =	1.55	Vel. de corte = $4 \cdot Q / \pi \cdot R^3$				
R=radio del capilar .cm =	0.025	Esf. de corte = $R \cdot DP_c / 2 \cdot L$				
R cubica =	1.5625E-05	Viscosidad = Esf. de corte/Vel. de corte				
VELOCIDAD	FUERZA	GASTO	CAIDA PRES	VEL. CORTE	ESF CORTE	VISCOSIDA D
CM/MIN	KG	CM3/SEG	DIAS/CM2	1/SEG	DINAS/CM2	POISES
0.060	27.00	0.00071250	37136842.1	58.0597232	299490.662	5158.32053
0.200	41.00	0.00237500	56392982.5	193.532411	454782.117	2349.90157
0.600	58.65	0.00712500	80669473.7	580.597232	650560.272	1120.50185
2.000	94.00	0.02375000	129291228	1935.32411	1042671.19	538.757922
6.000	133.50	0.07125000	183621053	5805.97232	1480814.94	255.050293
20.000	196.20	0.23750000	269861053	19353.2411	2176298.81	112.451387

TABLA 4.2 REOMETRIA CAPILAR MUESTRA N° 1 A 210°C

TABLA 4.3		REOMETRIA CAPILAR				
	FORMULACION.	MUESTRA No.2				
	TEMPERATURA.	190°C	L/D=31.1			
Pi =	3.14159265	Gasto 'Q' = $V \cdot Ap / 60$				
Ap = área del piston .cm2=	0.7125	Caída de presión en el capilar = $F \cdot 980000 / Ap$				
L=long. del capilar .cm =	1.55	Vel. de corte = $4 \cdot Q / \pi \cdot R^3$				
R=radio del capilar .cm =	0.025	Esf. de corte = $R \cdot DP_c / 2 \cdot L$				
R cubica =	1.5625E-05	Viscosidad = $Esf. de corte / Vel. de corte$				
VELOCIDAD	FUERZA	GASTO	CAIDA PRES	VEL. CORTE	ESF CORTE	VISCOSIDA D
CM/MIN	KG	CM3/SEG	DIAS/CM2	1/SEG	DINAS/CM2	POISES
0.060	49.45	0.00071250	68015438.6	58.0597232	548511.602	9447.36852
0.200	77.25	0.00237500	106252632	193.532411	856876.061	4427.55845
0.600	107.50	0.00712500	147859649	580.597232	1192416.53	2053.77577
2.000	158.50	0.02375000	218007018	1935.32411	1758121.11	908.437559
6.000	221.00	0.07125000	303971930	5805.97232	2451386.53	422.218088
20.000	345.00	0.23750000	474526316	19353.2411	3826825.13	197.73562

TABLA 4.3 REOMETRIA CAPILAR MUESTRA N° 2 A 190°C

TABLA 4.4		REOMETRIA CAPILAR				
	FORMULACION.	MUESTRA No.2				
	TEMPERATURA.	210°C	L/D=31.1			
Pi =	3.14159265	Gasto 'Q' = $V \cdot Ap / 60$				
Ap = área del piston .cm2=	0.7125	Caída de presión en el capilar = $F \cdot 980000 / Ap$				
L=long. del capilar .cm =	1.55	Vel. de corte = $4 \cdot Q / \pi \cdot R^3$				
R=radio del capilar .cm =	0.025	Esf. de corte = $R \cdot DP_c / 2 \cdot L$				
R cubica =	1.5625E-05	Viscosidad = $Esf. de corte / Vel. de corte$				
VELOCIDAD	FUERZA	GASTO	CAIDA PRES	VEL. CORTE	ESF CORTE	VISCOSIDA D
CM/MIN	KG	CM3/SEG	DIAS/CM2	1/SEG	DINAS/CM2	POISES
0.060	28.60	0.00071250	39337543.9	58.0597232	317238.257	5463.99878
0.200	41.25	0.00237500	56736842.1	193.532411	457555.178	2364.23024
0.600	74.70	0.00712500	102745263	580.597232	828590.832	1427.13535
2.000	105.00	0.02375000	144421053	1935.32411	1164685.91	601.804061
6.000	146.20	0.07125000	201089123	5805.97232	1621686.47	279.313504
20.000	209.80	0.23750000	288567018	19353.2411	2327153.37	120.246183

TABLA 4.4 REOMETRIA CAPILAR MUESTRA N° 2 A 210°C

TABLA 4.5		REOMETRIA CAPILAR				
	FORMULACIÓN.	MUESTRA No.3				
	TEMPERATURA.	190°C	L/D=31.1			
Pi =	3.14159265	Gasto 'Q'		= V*Ap/60		
Ap = área del piston .cm2=	0.7125	Caída de presión en el capilar = F*980000/Ap				
L=long. del capilar .cm =	1.55	Vel. de corte = 4*Q/Pi*R3				
R=radio del capilar .cm =	0.025	Esf. de corte = R*DPc/2*L				
R cubica =	1.5625E-05	Viscosidad = Esf. de corte/Vel. de corte				
VELOCIDAD	FUERZA	GASTO	CAIDA PRES	VEL. CORTE	ESF CORTE	VISCOSIDA D
CM/MIN	KG	CM3/SEG	DIAS/CM2	1/SEG	DINAS/CM2	POISES
0.060	50.90	0.00071250	70009824.6	58.0597232	564595.359	9724.38944
0.200	84.40	0.00237500	116087018	193.532411	936185.625	4837.35836
0.600	116.00	0.00712500	159550877	580.597232	1286700.62	2216.16734
2.000	167.50	0.02375000	230385965	1935.32411	1857951.33	960.020765
6.000	242.00	0.07125000	332856140	5805.97232	2684323.71	462.338358
20.000	462.50	0.23750000	636140351	19353.2411	5130164.12	265.08036

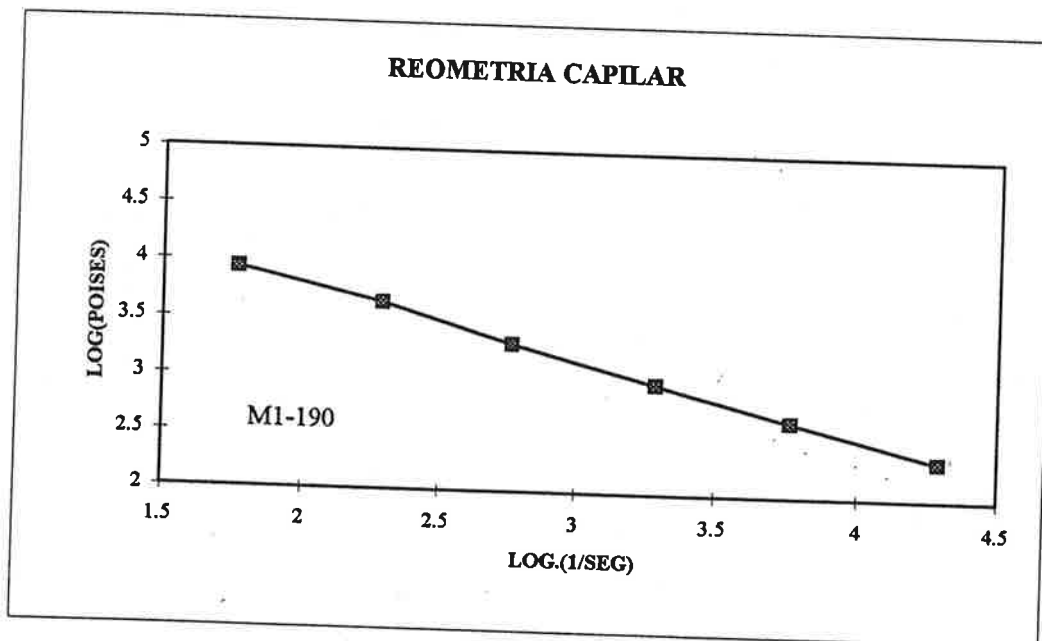
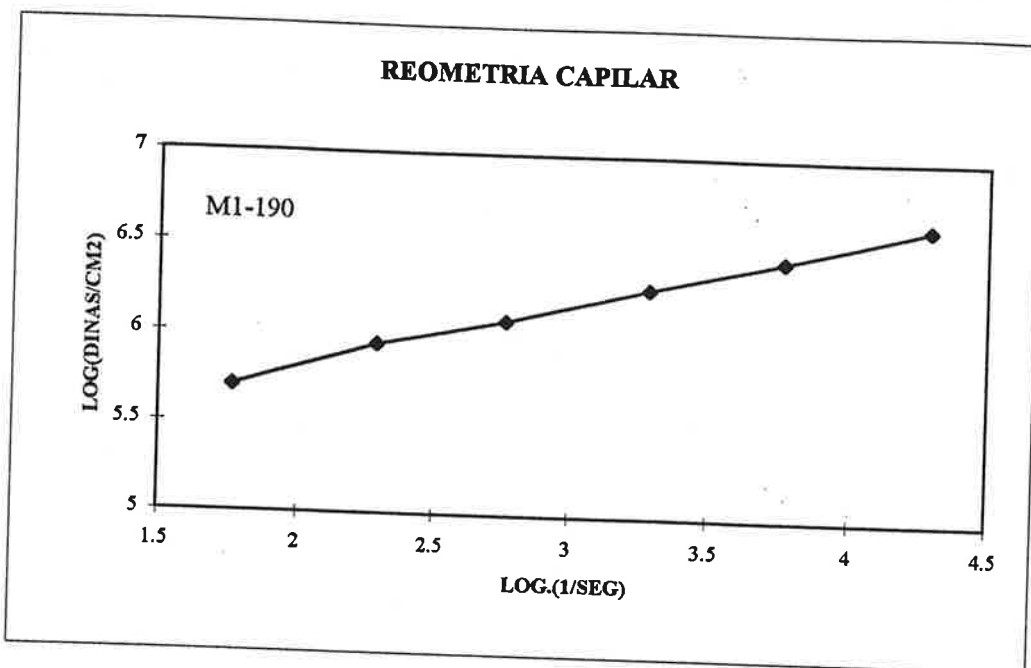
TABLA 4.5 REOMETRIA CAPILAR MUESTRA N° 3 A 190°C

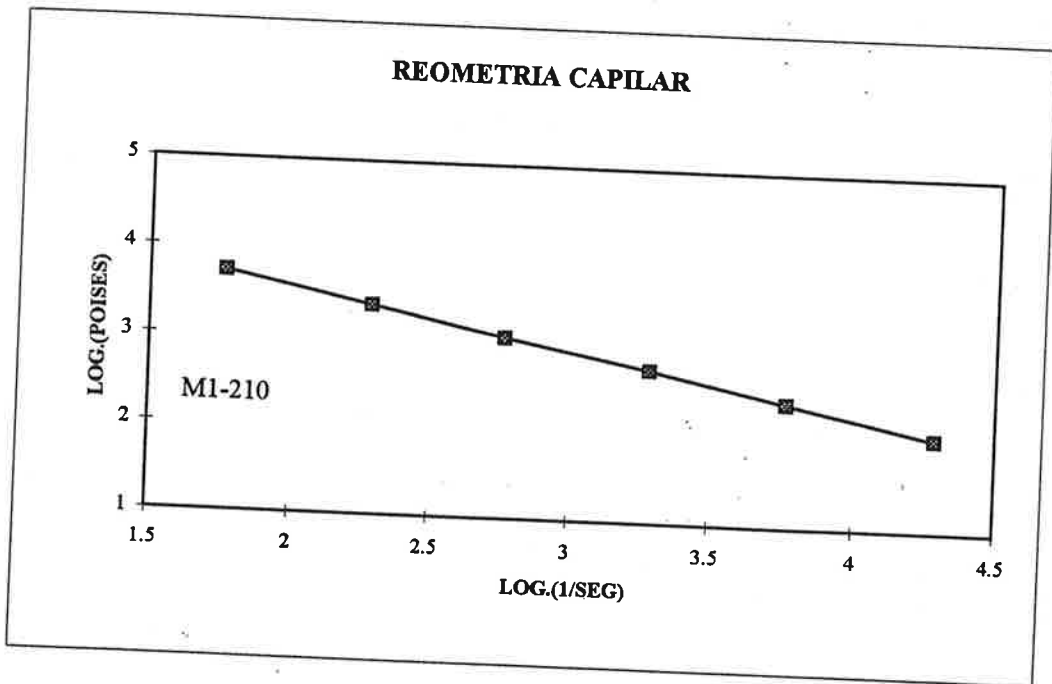
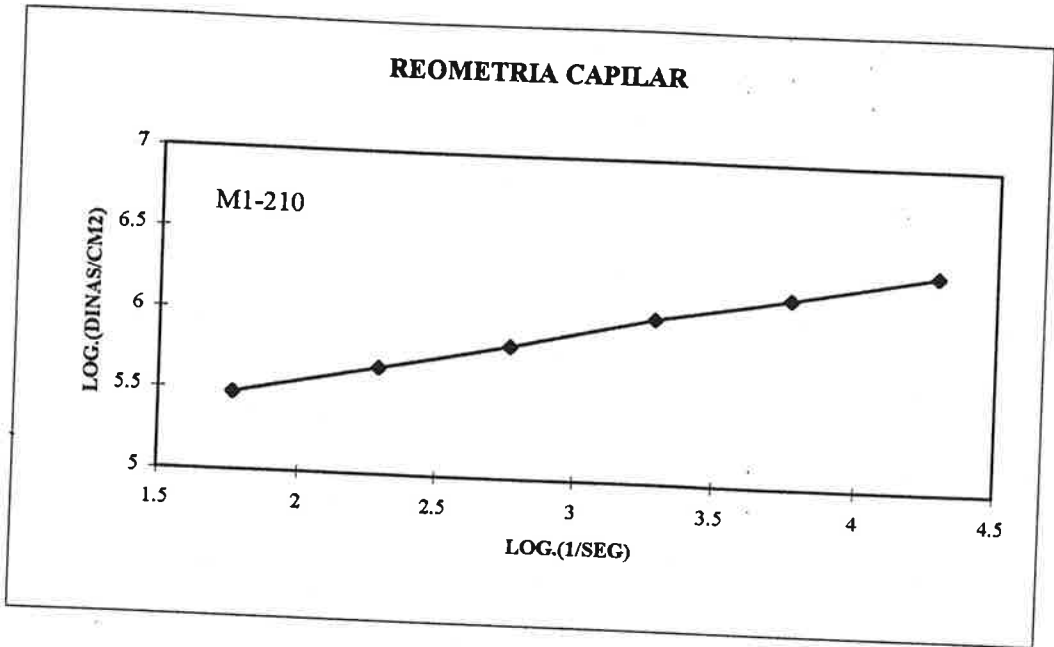
TABLA 4.6		REOMETRIA CAPILAR				
	FORMULACIÓN.	MUESTRA No.3				
	TEMPERATURA.	210°C	L/D=31.1			
Pi =	3.14159265	Gasto 'Q'		= V*Ap/60		
Ap = área del piston .cm2=	0.7125	Caída de presión en el capilar = F*980000/Ap				
L=long. del capilar .cm =	1.55	Vel. de corte = 4*Q/Pi*R3				
R=radio del capilar .cm =	0.025	Esf. de corte = R*DPc/2*L				
R cubica =	1.5625E-05	Viscosidad = Esf. de corte/Vel. de corte				
VELOCIDAD	FUERZA	GASTO	CAIDA PRES	VEL. CORTE	ESF CORTE	VISCOSIDA D
CM/MIN	KG	CM3/SEG	DIAS/CM2	1/SEG	DINAS/CM2	POISES
0.060	29.18	0.00071250	40135298.2	58.0597232	323671.76	5574.80715
0.200	50.55	0.00237500	69528421.1	193.532411	560713.073	2897.2567
0.600	76.65	0.00712500	105427368	580.597232	850220.713	1464.38988
2.000	107.00	0.02375000	147171930	1935.32411	1186870.4	613.266996
6.000	154.80	0.07125000	212917895	5805.97232	1717079.8	295.74371
20.000	236.60	0.23750000	325428772	19353.2411	2624425.58	135.606515

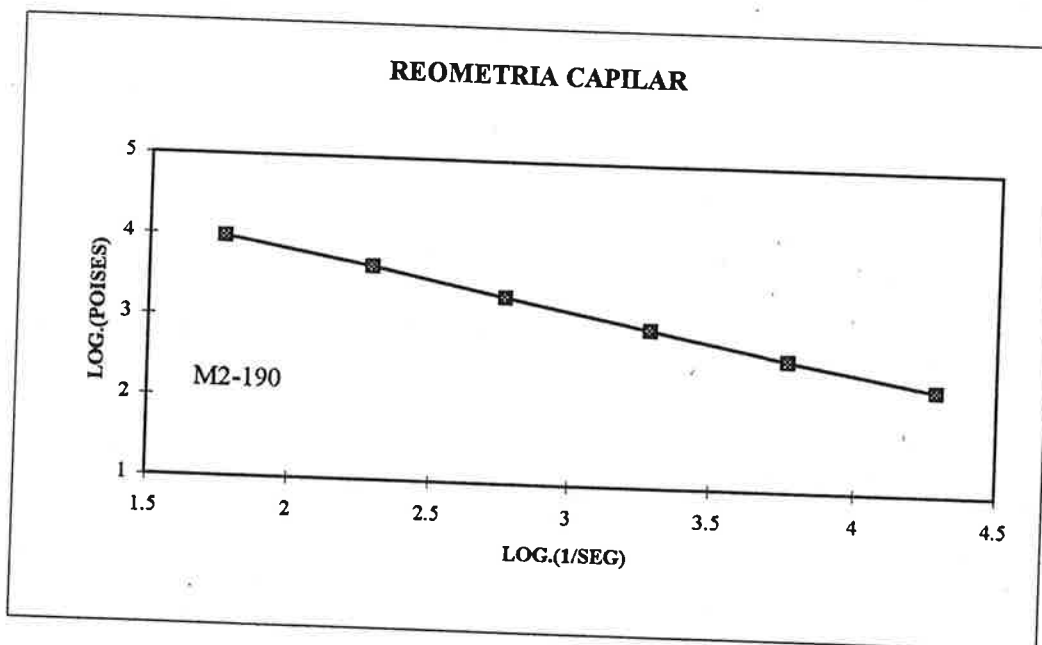
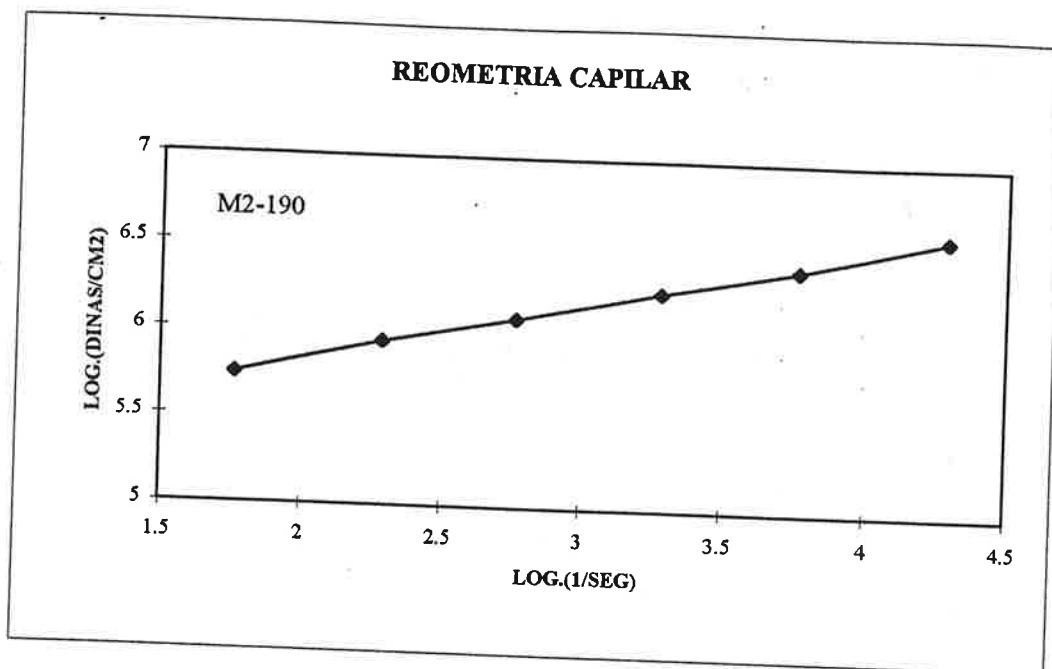
TABLA 4.6 REOMETRIA CAPILAR MUESTRA N° 3 A 190°C

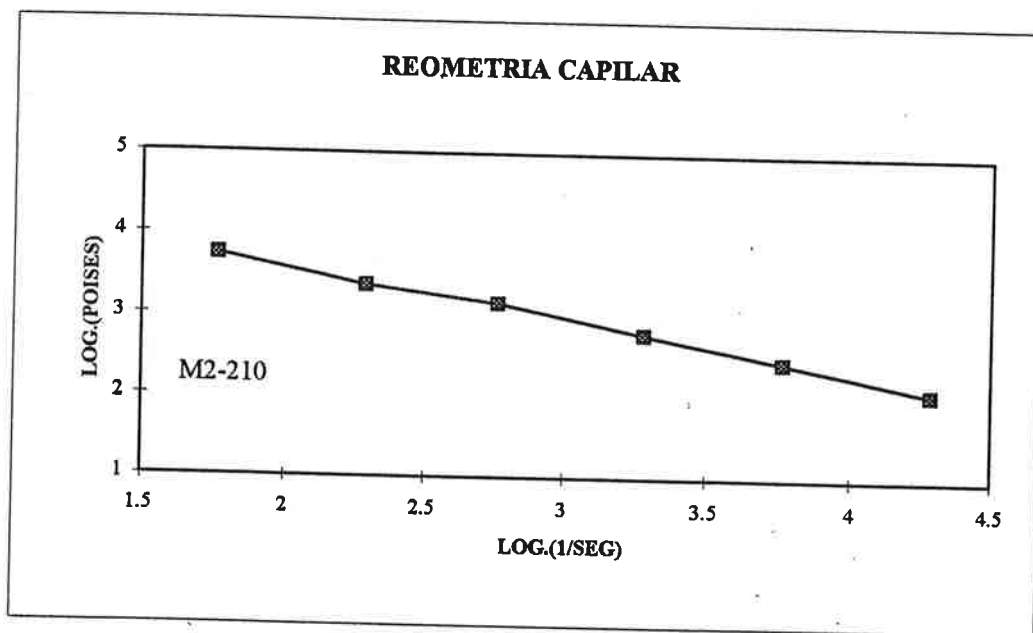
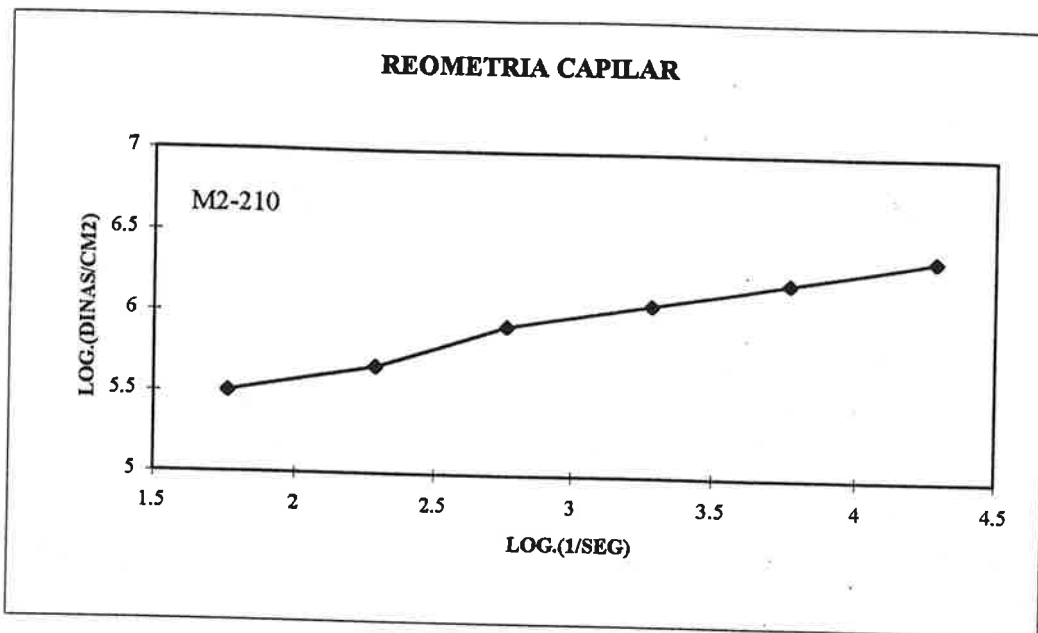
TABLA 4.7		REOMETRIA CAPILAR				
FORMULACION.		MUESTRA No.4				
TEMPERATURA.		190°C	L/D=31.1			
Pi =	3.14159265	Gasto 'Q'		= V*Ap/60		
Ap = área del piston .cm2=	0.7125	Caída de presión en el capilar = F*980000/Ap				
L=long. del capilar .cm =	1.55	Vel. de corte = 4*Q/Pi*R3				
R=radio del capilar .cm =	0.025	Esf. de corte = R*DPc/2*L				
R cubica =	1.5625E-05	Viscosidad = Esf. de corte/Vel. de corte				
VELOCIDAD	FUERZA	GASTO	CAIDA PRES	VEL. CORTE	ESF CORTE	VISCOSIDA D
CM/MIN	KG	CM3/SEG	DIAS/CM2	1/SEG	DINAS/CM2	POISES
0.060	43.40	0.00071250	59694035.1	58.0597232	481403.509	8291.52262
0.200	70.25	0.00237500	96624561.4	193.532411	779230.334	4026.35574
0.600	98.10	0.00712500	134930526	580.597232	1088149.41	1874.18979
2.000	145.80	0.02375000	200538947	1935.32411	1617249.58	835.647925
6.000	227.00	0.07125000	312224561	5805.97232	2517940.01	433.681022
20.000	373.00	0.23750000	513038596	19353.2411	4137408.04	213.783729

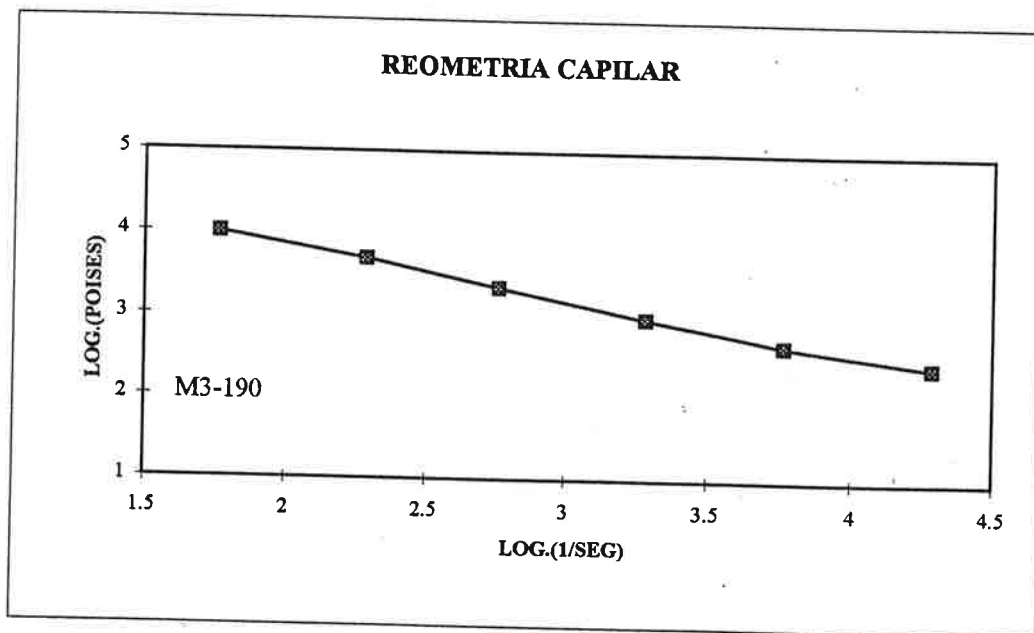
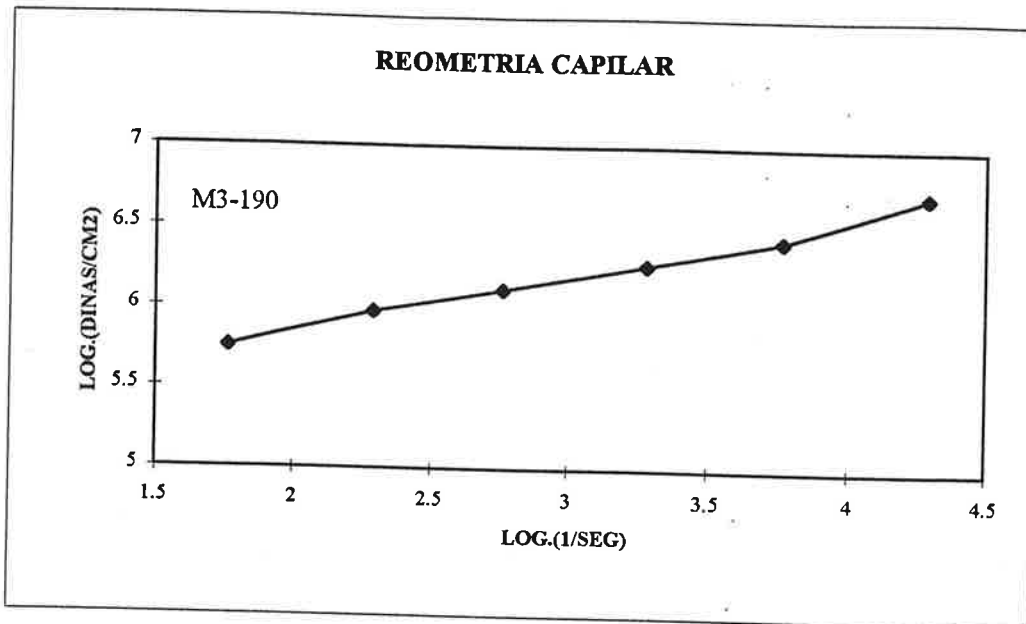
TABLA 4.7 REOMETRIA CAPILAR MUESTRA N° 4 A 190°C

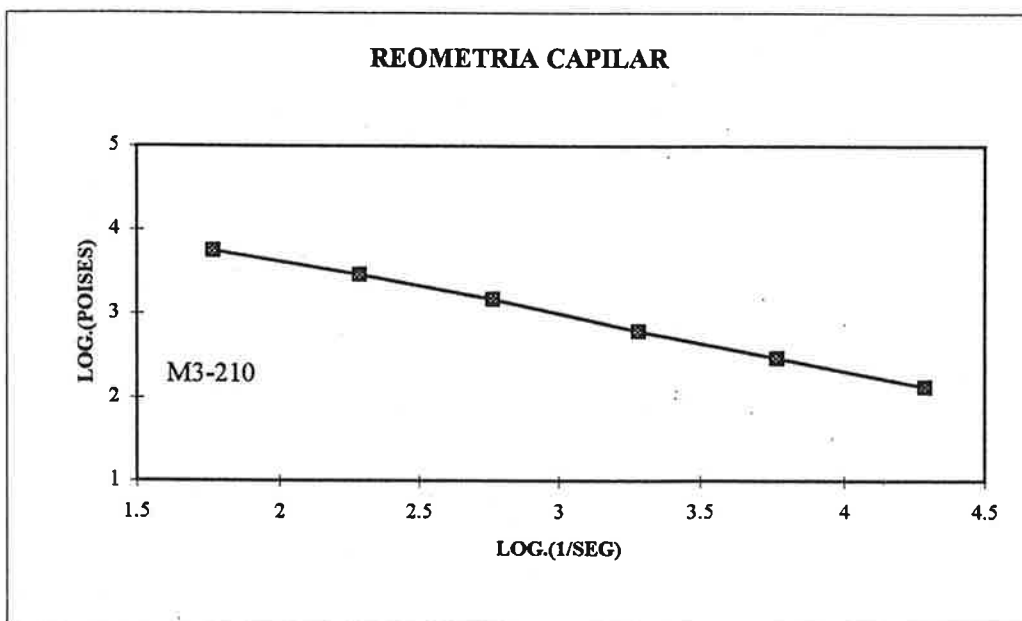
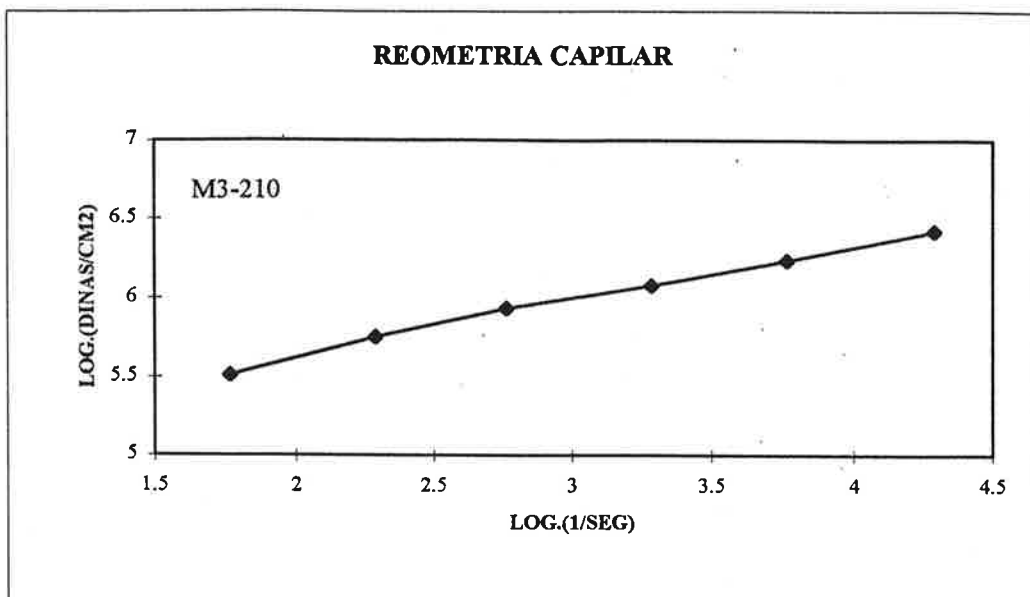


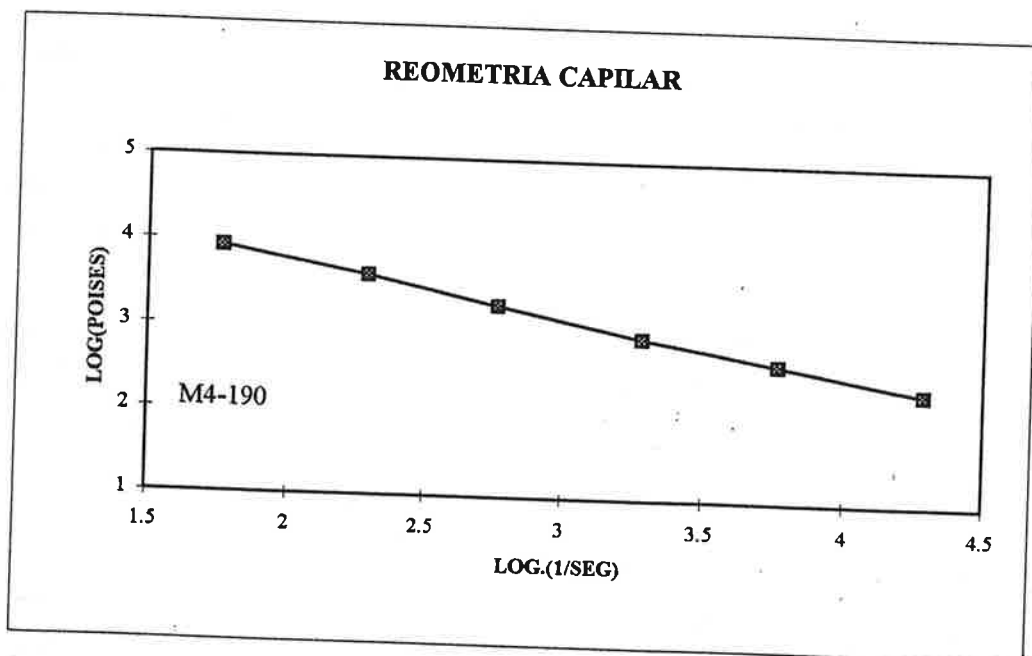
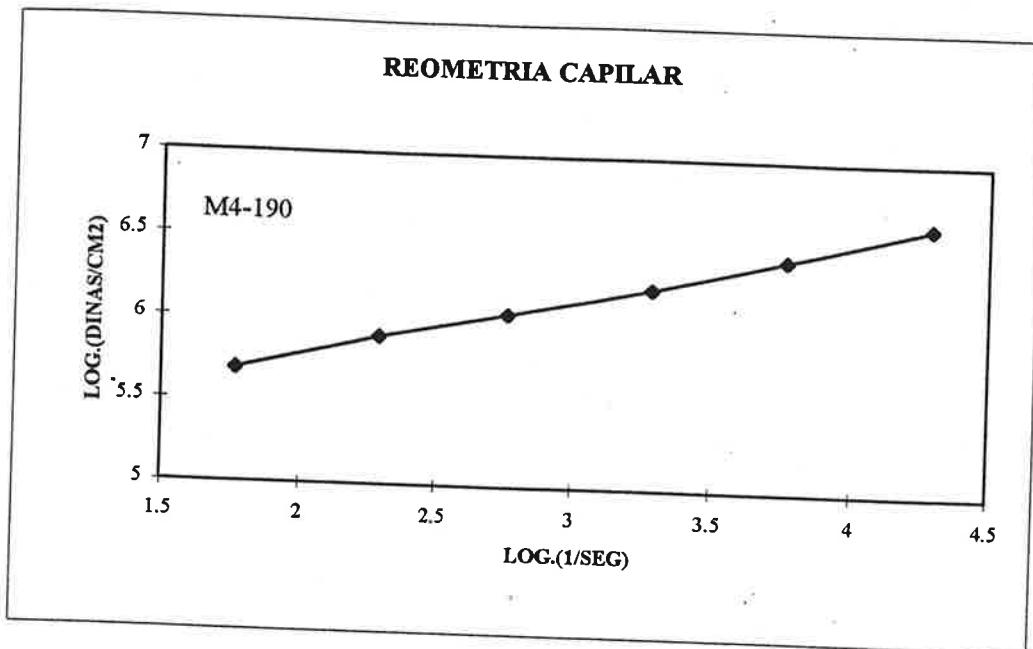












ANEXO b

PROCESO DE INTRODUCCIÓN DE DATOS PARA LA GENERACION DEL MODELO Y SU SOLUCION.

```

/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 5.5.3 UP19990405      11:51:13      09/15/2000
/input,menust,tmp      //.....,1
/GRA,POWER
/GST,ON
RESUME,dado3,db,A:\,0
/COM,ANSYS RELEASE 5.5.3 UP19990405      11:52:07      09/15/2000
ERASE
APLOT
EPLLOT
!*
/NOPR
/PMETH,OFF
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,1
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Thermal
!*
/PREP7
!*
ET,1,PLANE55

```

```

!*
ET,2,PLANE55
!*
ETDEL,2
!*
!*
UIMP,1,DENS, , ,7865,
UIMP,1,KXX, , ,19,
UIMP,1,C, , ,0.46e3,
UIMP,1,ENTH, , , ,
UIMP,1,HF, , , ,
UIMP,1,EMIS, , ,0.46,
UIMP,1,QRATE, , , ,
UIMP,1,RSVX, , , ,
!*
!*
UIMP,2,DENS, , ,920,
UIMP,2,KXX, , ,0.3023,
UIMP,2,C, , ,3768,
UIMP,2,ENTH, , , ,
UIMP,2,HF, , , ,
UIMP,2,EMIS, , , ,
UIMP,2,QRATE, , , ,
UIMP,2,RSVX, , , ,
!*
!*
UIMP,2,DENS, , ,920,
UIMP,2,KXX, , ,0.3023,
UIMP,2,C, , ,3768,
UIMP,2,ENTH, , , ,
UIMP,2,HF, , , ,
UIMP,2,EMIS, , , ,
UIMP,2,QRATE, , , ,
UIMP,2,RSVX, , , ,
!*
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
!*

```

```

TYPE, 1
MAT, 1
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
!*
CM, _Y, AREA
ASEL, , , , 4
CM, _Y1, AREA
CHKMSH, 'AREA'
CMSEL, S, _Y
!*
AMESH, _Y1
!*
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
CMDEL, _Y2
!*
ACLEAR, 4
APLOT
MSHAPE, 1, 2D
!*
CM, _Y, AREA
ASEL, , , , 4
CM, _Y1, AREA
CHKMSH, 'AREA'
CMSEL, S, _Y
!*
AMESH, _Y1
!*
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
CMDEL, _Y2
!*
APLOT
CM, _Y, AREA
ASEL, , , , 1
CM, _Y1, AREA

```

```

CHKMSH, 'AREA'
CMSEL, S, _Y
!*
AMESH, _Y1
!*
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
CMDEL, _Y2
!*
TYPE, 1
MAT, 2
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
!*
CM, _Y, AREA
ASEL, , , , 2
CM, _Y1, AREA
CHKMSH, 'AREA'
CMSEL, S, _Y
!*
AMESH, _Y1
!*
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
CMDEL, _Y2
!*
GPLOT
!*
KEYOPT, 1, 1, 0
KEYOPT, 1, 3, 1
KEYOPT, 1, 4, 0
KEYOPT, 1, 8, 0
KEYOPT, 1, 9, 0
!*
FLST, 2, 6, 4, ORDE, 6
FITEM, 2, 4
FITEM, 2, 12

```



```
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,28
FITEM,2,-29
/GO
!*
SFL,P51X,CONV,146,,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,2
/GO
!*
BFL,P51X,HGEN,13141
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,2
/GO
!*
BFL,P51X,HGEN,13141
BFELI, ALL
/GO
!*
BFUNIF,HGEN,1500
/GO
!*
BFUNIF,HGEN,1500
FINISH
/POST1
FINISH
/SOLU
/STAT,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
*SET,_ZF,1
!*
/EFACE,_ZF
PLNSOL,TEMP,,0,
*SET,_ZF,1
!*

```

```
/EFACE,_ZF
PLNSOL,TEMP, ,0,
FINISH
/PREP7
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,2
/GO
!*
DL,P51X, ,TEMP,130,0
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,2
/GO
!*
SFL,P51X,CONV,140, , ,
FINISH
/SOLU
/STAT,SOLU
SOLVE
FINISH
/PREP7
FINISH
/POST1
*SET,_ZF,1
!*
/EFACE,_ZF
PLNSOL,TEMP, ,0,
*SET,_ZF,1
!*
/EFACE,_ZF
PLNSOL,TEMP, ,0,
FINISH
/SOLU
FLST,2,230,2,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-230
BFEDELE,P51X,HGEN
FLST,2,3,5,ORDE,3
FITEM,2,1
```

```

FITEM,2,-2
FITEM,2,4
BFADELE,P51X,HGEN
/REPLOT
APLOT
GPLOT
GPLOT
/STAT,SOLU
SOLVE
/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 5.5.3 UP19990405 16:02:08 09/19/2000
/input,menust,tmp .....1
/GRA,POWER
/GST,ON
RESUME,dado1,db,,0
/COM,ANSYS RELEASE 5.5.3 UP19990405 16:02:24 09/19/2000
ERASE
/REPLOT
EPLOT
GPLOT
/POST1
*SET,_ZF,1
!*
/EFACE,_ZF
PLNSOL,TEMP,,0,
FINISH
!*
! /EXIT,MODEL
/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 5.5.3 UP19990405 09:31:24 09/25/2000
/input,menust,tmp .....1
/GRA,POWER
/GST,ON
RESUME,dado1,db,,0
/COM,ANSYS RELEASE 5.5.3 UP19990405 09:31:37 09/25/2000
ERASE
/POST1
*SET,_ZF,1

```

```
!*  
/EFAGE,_ZF  
PLNSOL,TEMP, ,0,  
/REPLOT,RESIZE  
/REPLOT,RESIZE  
FINISH  
!*  
! /EXIT,MODEL
```

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ehrenstein, G.W. Erhard, G., *Designing with Plastics, A Report on the State of the Art*, Edit. Hanser Publishers, Munich, 1984, p 9.
- [2] Tadmor, Z., Klein "Engineering Principles of Plasticating Extrusion, Reinhold, New York 1970.
- [3] Lindt, J.T., Flow of a Temperature Dependent Power – Law Model Fluid Between Parallel Plates: An Aproximation for Flow in a Screw Extruder, *Polym. Enng. Sci.*, vol.29, 1989,p.471.
- [4] Karwe, M.V., Numerical Simulations of Fluid Flow and Heat Transfer in a Single-Screw Extruder for Non-Newtonian Fluids, *Numerical Heat Transfer, Part A*, vol. 17,1990,p. 167.
- [5] Campbell, G.A. Sweeney, P.A. Felton, J.N., Experimental Investigation of the Drag Flow Assumption in Extruder Analysis , *Polym. Eng. Sci.*, vol 32, 1992, p. 1765.
- [6] Spalding M.A., Dooley, J., Hyun, K.S., Strand, S.R., Three Dimensional Analysis of the Metering Section of a Single – Screw Extruder, ANTEC, 1993, p.1533.
- [7] Plumley , T.A., Spalding, M.A., Dooley, J., Hyun, K.S., Three Dimensional Numerical Analysis of an Energy Transfer (ET) Screw Section of a Single-Screw Extruder, ANTEC,1994, P.332.
- [8] Sastrohartono, T., Jaluria, Y., Essegir, M., Sernas, V., A Numerical and Experimental Study of Three- Dimensional Transport in the Channel of an Extruder for Polymeric Materials, *Int.J. Heat Mass Transfer*, vol. 38,1995, p.1957
- [9] Li, Y., Hsieh, F. Modeling of Flow in a Single Screw Extruder, *Journal of Food Engineering*, vol.27, 1996, p.353.
- [10] Jaluria, Y., Heat and Mass Transfer in the Extrusion of Non-Newtonian Materials, *Advances in Heat Transfer*, vol.28, 1996, p.145.
- [11] Milano G., Tagleificio, I., Non Isothermal Flow of Rigid PVC in Plasticating Extrusion, Part 1, *Heat and Technology*, Vol. 6, 1998, p.131
- [12] ANSYS Element Reference . Version 5.5 p. 4.55
- [13] R.B.Bird, Fenómenos de transporte, Editorial Reverte, Vol. 1 p. 1.12
- [14] Ramos de Valle F. , Extrusion de Plásticos, Vol. 1 p 47

- [15] Ramos de Valle F. , Extrusion de Plásticos, Vol. 1, 1993, p 122
- [16] Manrique, Jose A., Transferencia de calor, Vol. 1, 1981,p. 11
- [17] Karlekar B.V. Transferencia de calor, p.486,764
- [18] Karlekar B.V, Transferencia de calor, p.775
- [19] Mink W. El plástico en la industria. Vol.1 p. 61
- [20] Chung J.T., Correction of Entrance Pressure Loss in Capillary Rheometry, Plastics Engineering, Vol. 38, No.9, September 1982, p.35-36
- [21] R.B.Bird, Fenómenos de transporte, Editorial Reverte, Vol. 1 p. 3.40
- [22] Rubio Carlos, Apuntes de Clase de Método de Elemento Finito. Vol. 1
- [23] Reddy J.N. An Introduction to the Finite Element Method, Second Edition, Mc Graw- Hill ,1993, p. 11
- [24] Manrique Jose A., Transferencia de calor, vol. 1, 1981, p.43