

APLICACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE INGENIERÍA ASISTIDA
POR COMPUTADOR PARA EL ANÁLISIS UNIDIMENSIONAL DE
TORNILLOS DE EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS

LUIS FELIPE BERNAL SIERRA

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
AREA DE PLÁSTICOS
MEDELLÍN
2005

APLICACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE INGENIERÍA ASISTIDA
POR COMPUTADOR PARA EL ANÁLISIS UNIDIMENSIONAL DE
TORNILLOS DE EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS

LUIS FELIPE BERNAL SIERRA

Trabajo de grado para optar por el
título de ingeniero mecánico

Asesor principal
Carlos Arturo Rodríguez Arroyave
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
AREA DE PLÁSTICOS
MEDELLÍN
2005

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que hacen posible que realicemos nuestros sueños, especialmente a mis padres por su apoyo durante toda mi formación.

CONTENIDO

	pág.
0. INTRODUCCIÓN.....	12
1. OBJETIVOS.....	13
1.1 GENERAL.....	13
1.2 ESPECÍFICOS.....	13
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 EL PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	15
2.2 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE TORNILLOS EXTRUSORES.....	16
2.1.2 Nextrucad.....	19
2.2.2 Flow 2000.....	20
2.3.2 Extrusim 2000	21
2.4.2 Extrud-2000.....	21
3. MODELADO DE TORNILLOS DE EXTRUSIÓN	24
3.1 GEOMETRÍA DE UN EXTRUSOR	25
3.2 ZONA DE ALIMENTACIÓN	31
3.2.1 Tolva	31
3.2.2 Tornillo	33
3.3 ZONA DE COMPRESIÓN	38
3.3.1. Etapa 1.....	40
3.3.2 Etapa 2.....	42

3.4 ZONA DE DOSIFICACIÓN	46
4. LA INTERFASE DE PROGRAMACIÓN DE APLICACIONES (API) DE SOLIDWORKS.....	49
5. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN.	50
5.1 ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA	50
5.2 ALGORITMO DE CÁLCULO	51
6. APLICACIÓN “EXTRUANÁLISIS” – EJEMPLO PRÁCTICO	53
6.1 INSTALACIÓN.....	53
6.2 EJECUCIÓN DE LA APLICACIÓN .EXTRUANÁLISIS.....	54
6.2.1 Datos de entrada del tornillo	54
6.2.2 Geometría del tornillo.....	56
6.2.3. Condiciones del proceso	57
6.2.4. Resultados	59
6.2.5. Reporte	60
6.2.6. Sujeción y punta.....	63
7. RESULTADOS.....	65
8. LIMITACIONES DE LA APLICACIÓN EXTRUANÁLISIS.	66
9. CONCLUSIONES.....	67
10. PROPUESTAS PARA FUTUROS PROYECTOS.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Diagrama extrusora monohusillo	14
Ilustración 2. Pantalla de resultados software Nextrucad	19
Ilustración 3. Ingreso de datos del proceso en el software Flor 2000.	20
Ilustración 4. Presión a lo largo del tornillo en Extrusim 2000.....	21
Ilustración 5. Ingreso de la geometría del tornillo en Extrud-2000	22
Ilustración 6. Extrusora convencional de termoplásticos.	24
Ilustración 7. Geometría de un tornillo extrusor.	26
Ilustración 8. Componentes de velocidad en el cilindro.	30
Ilustración 9. Campos de tensión estáticos y dinámicos.....	31
Ilustración 10. Clases de flujo en condiciones dinámicas	32
Ilustración 11. Fuerzas que actúan sobre un elemento diferencial	35
Ilustración 12. Proceso de fusión de Maddock y Tadmor	39
Ilustración 13. Etapas en la zona de compresión.....	40
Ilustración 14. Sección transversal de la Etapa 1	40
Ilustración 15. Sección transversal de la Etapa 2	43
Ilustración 16. Balances de masa sobre la interfase sólido-fundido.....	45
Ilustración 17. Sección transversal de la plastificación	47
Ilustración 18. Algoritmo global del programa.....	51
Ilustración 19. Algoritmo global del programa.....	52
Ilustración 20. Pantalla de entrada ExtruAnálisis.....	54
Ilustración 21. Pantalla datos de entrada tornillo.	55
Ilustración 22. Pantalla geometría del tornillo.	56
Ilustración 23. Pantalla condiciones del proceso.	57
Ilustración 24. Pantalla condiciones del proceso.	58
Ilustración 25. Pantalla condiciones del proceso.	59

Ilustración 26. Pantalla resultados.	60
Ilustración 27. Hoja 1 reporte del análisis en Excel.....	61
Ilustración 28. Hoja 2 reporte del análisis en Excel.....	62
Ilustración 29. Pantalla selección de sujeción y punta.	63
Ilustración 30. Pantalla tornillo modelado.	64

NOMENCLATURA

CARACTERES ROMANOS

CR	Relación de compresión de profundidades, adimensional
c_s	Calor específico del polímero, J/kg°C
D_b	Diámetro interior del cilindro, m.
D_i	Diámetro interno del tornillo, m.
$D_s = D$	Diámetro del tornillo, m.
e	Espesor de los filetes, m.
f	Coefficiente de fricción estático, adimensional.
f_b	Coefficiente de fricción en la superficie del cilindro, adimensional.
f_s	Coefficiente de fricción en la superficie del tornillo, adimensional.
H	Profundidad del canal, m.
H_1	Profundidad del canal en la zona de alimentación, m.
H_2	Profundidad del canal en la zona de dosificación, m.
k_m	Conductividad térmica del fundido, adimensional.
L/D	Relación entre longitud y diámetro del tornillo, adimensional
N	Frecuencia de rotación del tornillo, rpm.
P_1	Presión en la entrada del sistema, MPa.
P_2	Presión a la salida del incremento en vueltas, MPa.
Q	Flujo volumétrico a la salida del extrusor, kg/h.
R_H	Radio de la tolva, m.
s	Paso, m.
T_b	Temperatura en la superficie interna del barril, °C.
T_m	Temperatura de fusión, °C.

T_s	Temperatura del tornillo, °C.
V_b	Velocidad tangencial de la superficie del cilindro, m/s.
V_{bx}	Componente de la velocidad V_b en la dirección cruzada, m/s.
V_{by}	Componente de la velocidad V_b en la dirección del canal, m/s.
V_j	Diferencia vectorial entre V_b y V_{sz} , m/s.
V_{sz}	Velocidad del lecho sólido en la dirección del canal, m/s
VCR	Relación de compresión de volumen, adimensional
W	Ancho del canal, m.
\bar{W}	Ancho del canal promedio, m.
X_1	Espesor del lecho sólido en el punto z_1 , m.
Y	Altura del material en la tolva, m.

CARACTERES GRIEGOS

α_m	Angulo de fricción interno, °.
δ_f	Juego radial, m.
ϕ	Angulo de transporte del gránulo, °.
θ_b	Angulo de la hélice en la superficie del cilindro, °.
θ_s	Angulo de la hélice en la superficie del tornillo, °.
$\bar{\theta}$	Angulo promedio de la hélice, °.
λ	Calor de fusión, J/kg.
μ	Viscosidad, Pa.s.
ρ_s	Densidad del lecho sólido, kg/m ³ .
ρ_m	Densidad del polímero fundido, kg/m ³ .
τ	Tensor del esfuerzo cortante, MPa.
Φ	Factor definido en la ecuación 40, gm/cm ^{1.5} .

0. INTRODUCCIÓN

La extrusión es uno de los procesos más importantes y básicos de la industria de la transformación del plástico. Procesos, tales como, la inyección, soplado, calandrado, entre otros, requieren de la unidad de plastificación, que en la mayoría de los casos es una extrusora (Noriega, 1996, 1).

Algunos ejemplos de piezas creadas mediante el proceso de extrusión continua comprenden películas, láminas, perfiles y tuberías, laminación o recubrimiento, hilado de fibras y monofilamentos, recubrimiento de alambre y de cable, peletizado y elaboración de compuestos entre otras (Chung, 2000, 2).

La importancia de la extrusión como proceso de conformado así como los adelantos tecnológicos que se están dando actualmente en nuestra región, hacen necesario que la industria colombiana se vea en la tarea de mejorar sus sistemas de producción para permanecer y crecer su participación en los mercados.

Una de las alternativas que se presenta en la búsqueda de ese mejoramiento se refiere al uso de herramientas computacionales de última generación en el diseño y manufactura de la maquinaria, que permiten al usuario conocer de antemano como será el desempeño de su planta y tomar decisiones con base en sus necesidades de producción.

Este proyecto tiene como objeto el desarrollo de un software para ser empleado como herramienta de consulta en la industria de los plásticos, y de esta manera tecnificar un poco el diseño de los tornillos de extrusión ya que actualmente en nuestro país para su fabricación pesan más los conocimientos empíricos que las soluciones de ingeniería.

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

Desarrollar una herramienta computacional basada en aplicaciones Visual Basic, que permita el análisis de los parámetros de operación en un tornillo de extrusión, a través de su implementación en una plataforma CAD comercial.

1.2 ESPECÍFICOS

1.2.1 Consultar los tipos de software para el análisis de tornillos existentes y establecer el punto de referencia a donde apunta el proyecto.

1.2.2 Establecer los modelos unidimensionales simplificados a utilizar.

1.2.3 Seleccionar un lenguaje de programación adecuado para facilitar el montaje de una plataforma dinámica y amigable para los usuarios.

1.2.4 Simular el comportamiento del polímero a lo largo del tornillo, con el fin de predecir variables como la capacidad de producción, requerimientos de potencia, variación de la presión, entre otras.

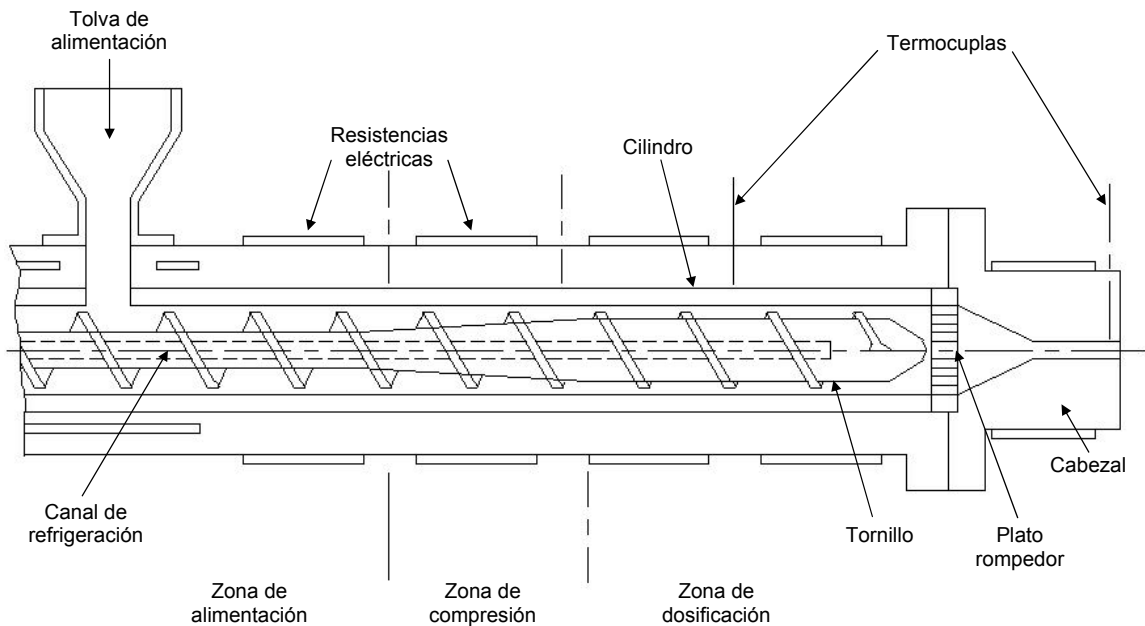
1.2.5 Elaborar un tutorial con las especificaciones y detalles del software en el cual se muestre la forma de interacción entre este y el usuario, mediante el desarrollo de un ejemplo práctico. Comparando los resultados con modelos teóricos.

1.2.6 Concluir con un análisis sobre las limitaciones de la herramienta, entre ellas los tipos de tornillos y materiales que se pueden utilizar.

2. MARCO TEÓRICO

El proceso de extrusión es realizado a través de de una maquina llamada extrusora. Para describir una extrusora, se deben definir algunos términos asociados. Primero extruir significa expulsar. Cuando un material es extruído, este es forzado a través de una abertura llamada cabezal. Por ejemplo, cuando se oprime una pasta dental del tubo, se extruye la pasta. Como el material fluye a través del cabezal, este adquiere la forma del canal de flujo del cabezal. Diferentes materiales pueden ser extruídos, como arcilla, cerámica, comestibles, metales, y claro está, plásticos (Rauwendaal, 1994, 15).

Ilustración 1. Diagrama extrusora monohusillo



(Morton – Jones, 1993, 96)

2.1 EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

El estudio de la dinámica del proceso de extrusión involucra diferentes áreas propias de la ingeniería mecánica como lo son la dinámica, el transporte de sólidos, el transporte de fluidos y la transferencia de calor.

Las extrusoras deben realizar varias funciones y de la forma en que se lleven a cabo, dependerá el adecuado desempeño del sistema. Éstas son:

- Recibir y almacenar el polímero sólido para asegurar la alimentación continua del sistema. Para ello, se cuenta con una tolva cuyo tamaño dependerá de la capacidad de producción de la extrusora.
- Transportar el material sólido hacia las zonas de extrusión posteriores. Este proceso es realizado por el tornillo desde la zona de alimentación.
- Calentar el polímero para asegurar su adecuada plastificación, dicho calentamiento se realiza habitualmente por un sistema de resistencias ubicado alrededor del cilindro, a lo largo de la longitud del husillo y un sistema de resistencias que mantiene el cabezal caliente y evita la solidificación del polímero antes de salir de la extrusora.
- Plastificar el polímero. La plastificación puede ser llevada a cabo a través de un proceso térmico de calentamiento o de un proceso mecánico por medio de la comprensión del material. Una extrusora combina ambas posibilidades usando el sistema de resistencias mencionado anteriormente y a través de la zona de plastificación del husillo, cuyo diseño debe asegurar que al finalizar dicha zona, todo el material polimérico se encuentre fundido.

- Homogenizar el plástico fundido. La extrusora debe asegurar que el material polimérico se encuentre a una temperatura homogénea y que las cargas, rellenos, pigmentos u otros polímeros (cuando se usan mezclas) sean perfectamente mezclados dispersados antes de extruir el semielaborado. Para tal fin se usan los sistemas de calefacción externos (las resistencias) o elementos de conversión de enfriamiento mecánico – térmico, tales como dispositivos de mezcla, los cuales se ubican habitualmente en la zona de dosificación de husillo.
- Finalmente extruir el semielaborado haciendo uso de la presión generada durante la compresión del material polimérico en el canal del husillo, el diseño de este debe asegurar que no se consuma mas presión de la generada por el husillo, de lo contrario el material no fluiría a través del mismo, debe asegurar que el flujo permanezca constante a las mismas condiciones de operación y que la velocidad de salida del extruído, sea igual a lo ancho del cabezal (Noriega, 1996, 2).

En algunos casos, la extrusora puede tener una zona de desgasificación, requerida para extraer humedad, sustancias volátiles, y otros gases que se forman durante el proceso de extrusión (Naranjo, 2001, 5).

2.2 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE TORNILLOS EXTRUSORES.

Los análisis matemáticos y físicos para otros procesos de conformado de piezas poliméricas como la inyección por ejemplo, son abundantes y hay materias especializadas en el calculo de las variables del proceso. En lo que respecta al tornillo de la extrusora, su diseño generalmente se da a partir de formulaciones empíricas y no se consulta como es debido la literatura dedicada a analizar matemáticamente el comportamiento del fluido a través de estos y las geometrías adecuadas para la correcta distribución del flujo.

Los desarrollos alcanzados en programas de simulación brindan a los empresarios la oportunidad de predecir variables como la cantidad de energía a consumir, la productividad a lograr, qué tipo de polímero es el ideal para su proceso, que configuración de máquina les brinda mayor eficiencia y qué perfil de temperatura debe emplearse. Además le permiten predecir y solucionar problemas como fracturas de material fundido, degradación e inestabilidad interfacial.

En general, los programas de simulación han sido usados para predecir el comportamiento de los procesos, en términos de la cantidad de flujo generado y de la temperatura y la presión. Pero un uso más interesante puede ser el de predecir los problemas potenciales que llegan a presentarse durante la transformación.

La tarea de simular en el computador el desempeño de diversos tipos de procesos de extrusión todavía presenta una variedad de retos. Quizás una razón para ello sea el hecho de que, aunque en apariencia la extrusión es un proceso simple, en realidad contiene fenómenos fisicoquímicos complejos. El extrusor es una bomba que tiene la función de fundir una mezcla de resinas y aditivos, y entregarla al final de la máquina en un flujo constante y estable, con una presión y temperatura determinadas, y con propiedades homogéneas a través de toda la masa: composición, temperatura, viscosidad, presión, flujo local, etc. En este caso, al mencionarse el concepto de homogeneidad también se incluye la idea de uniformidad de las propiedades del extruido en el tiempo.

Una etapa importante del diseño en extrusión es la determinación de las longitudes de alimentación, plastificación y dosificación de los tornillos, que puede lograrse a través de programas de simulación. En la zona de alimentación el material se transporta sólido, y la habilidad de generar presión está determinada por los factores de fricción; en las zonas de plastificación y dosificación se emplea un modelo de material fundido, en el cual la calidad está expresada en términos de

la temperatura del material a la salida del extrusor y de la distancia requerida para fundir completamente la resina (hasta el final de la zona de plastificación). Estos valores son proporcionados por los programas de simulación de extrusión, y pueden ser empleados para diseñar nuevas extrusoras, a partir del análisis de calibración en máquinas existentes.

La simulación del comportamiento del material desde el estado sólido hasta el estado líquido es la etapa que presenta mayores retos, pero otra dificultad puede presentarse cuando trata de aplicarse el programa de simulación a situaciones reales. El primer paso al aplicar de manera apropiada una simulación de extrusión es calibrar el programa. La calibración es la etapa en la cual se relacionan los resultados de los cálculos de simulación con las cantidades medidas en el proceso real de producción. Durante el proceso de calibración, el usuario básicamente determina el valor de las predicciones numéricas y su significado frente a las lecturas del proceso real.

La dificultad radica en que aún existen grandes incertidumbres en la medición directa de parámetros de proceso, como los valores de la viscosidad del polímero, las temperaturas del material fundido, los factores de fricción, las temperaturas del cilindro, entre otros. Si por ejemplo, la simulación predice que la temperatura de la masa fundida a la salida del extrusor es de 220°C pero las termocuplas del equipo leen 200°C, el usuario tiene la opción de aceptar que la simulación provee un 10% de error, o puede ajustar algunos parámetros del proceso dentro de la simulación (por ejemplo, elevando la temperatura del cilindro) para intentar tener una mejor correlación. Esta última opción puede ser la más aceptable, sobre todo si se tiene en cuenta que una limitante en el uso de los programas de simulación radica en la falta de conocimiento de los patrones de conducción de calor alrededor de la pared del cilindro por parte del usuario, y a que las lecturas de los controladores de temperatura pueden no ser exactas. Se debe tener en cuenta que los factores de fricción dependen de la temperatura del cilindro (Serrano @ 2005).

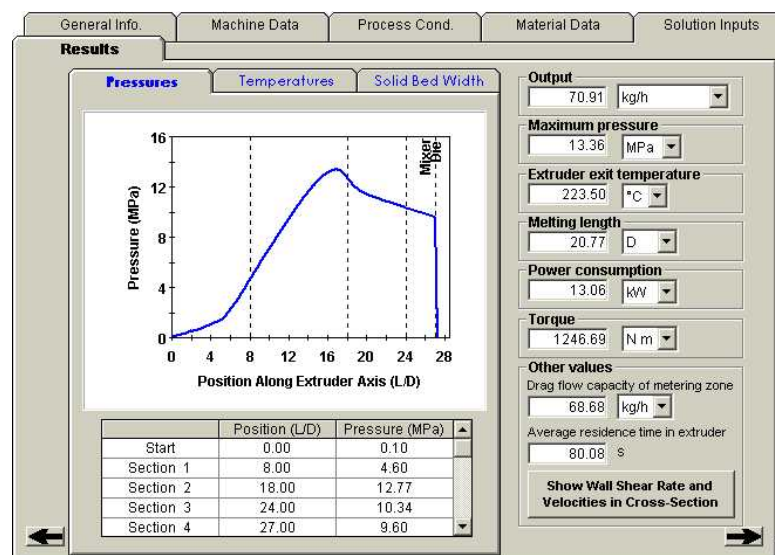
En el medio se encuentran diferentes tipos de software. A continuación se mencionan algunos que presentan características similares a lo que se pretende obtener con este proyecto.

2.1.2 Nextrucad

Programa que se basa en un paquete simulador de extrusión. Algunas de las variables como el perfil de lecho sólido, temperaturas de fundido e incrementos de presión, son calculadas en cualquier punto del tornillo, al tiempo que se estima la capacidad de producción, requerimiento de potencia, torque, entre otros. La ilustración 2 muestra la pantalla de resultados en la cual se aprecia gráficamente el comportamiento de la presión y numéricamente la capacidad de producción y, el consumo de potencia y el torque entre otras variables.

Los métodos numéricos utilizados son unidimensionales, partiendo de las ecuaciones de Danell para modelar la zona de alimentación, el modelo de Chung en la zona de compresión y análisis de masa para la zona de dosificación. Todas las ecuaciones utilizan materiales que permiten establecer aproximaciones mediante los modelos de viscosidad de Carreau o Ley de la Potencia.

Ilustración 2. Pantalla de resultados software Nextrucad



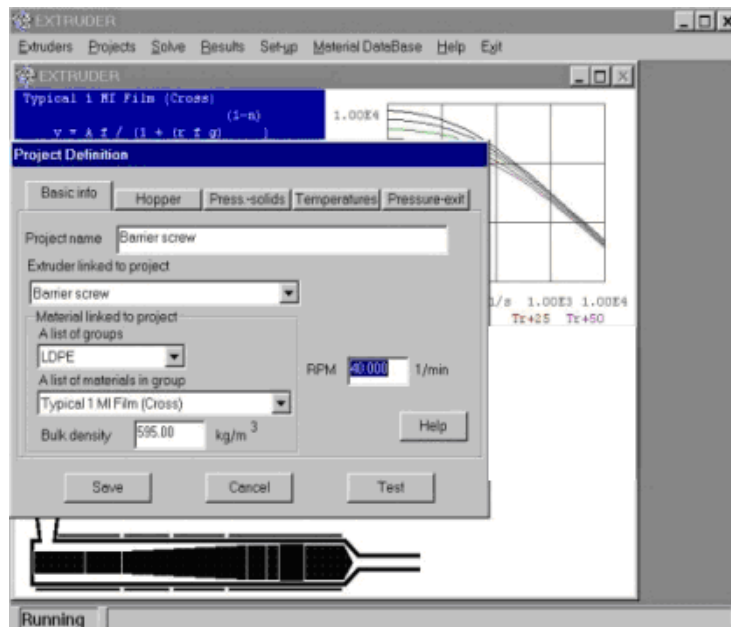
Polydynamics © 2005

2.2.2 Flow 2000

Este programa se compone de módulos o cajas de herramientas que permiten analizar los procesos de extrusión, el desempeño de los dados y la reología de los materiales. El módulo de extrusión emplea un sistema de análisis numérico por diferencias finitas que se basa en el trabajo de Agur y Vlachopoulos. La ilustración 3 muestra gráficamente la viscosidad del polímero y la pantalla de ingreso de datos del proceso.

Los tornillos pueden ser simulados empleando varios tipos de resinas para encontrar las condiciones de procesamiento más recomendables. El módulo más reciente incorporado en Flow 2000 es el Flow 3D, y presenta herramientas que le permiten al usuario desarrollar estudios detallados de flujos con características complejas. Puede ser empleado para analizar nuevos tornillos y dados de extrusión, así como también ofrece la posibilidad de ser usado para investigar y explicar ciertos fenómenos de flujo como la encapsulación de capas en sistemas de coextrusión con dado plano entre otros.

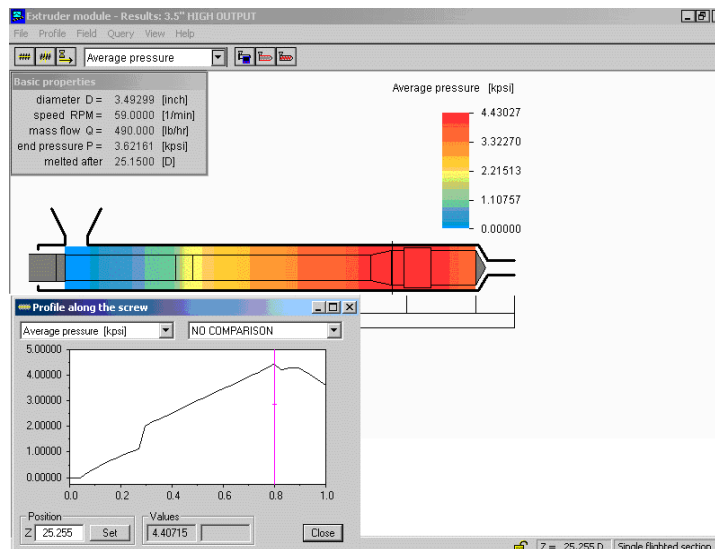
Ilustración 3. Ingreso de datos del proceso en el software Flor 2000.



2.3.2 Extrusim 2000

Programa diseñado para predecir el comportamiento de los extrusores de tornillo simple. Entre los parámetros que puede predecir se encuentran el consumo de energía, la productividad y el torque. También es posible realizar estudios de comparación para determinar la mejor geometría de tornillo y la mejor resina para el proceso, enmarcados dentro de un análisis de costos. Se ofrecen también programas diseñados a la medida de las necesidades de los usuarios y que pueden replicar cualquier sistema de extrusión. Tales ventajas permiten la solución de problemas como fractura del material fundido, inestabilidad interfacial, degradación del material, sistemas con presiones demasiado altas, compatibilidad de nuevos materiales con los equipos existentes, y otros más. En la ilustración 4 se aprecia gráficamente el comportamiento de la presión a lo largo del tornillo.

Ilustración 4. Presión a lo largo del tornillo en Extrusim 2000



Dualspiralsystems @ 2005

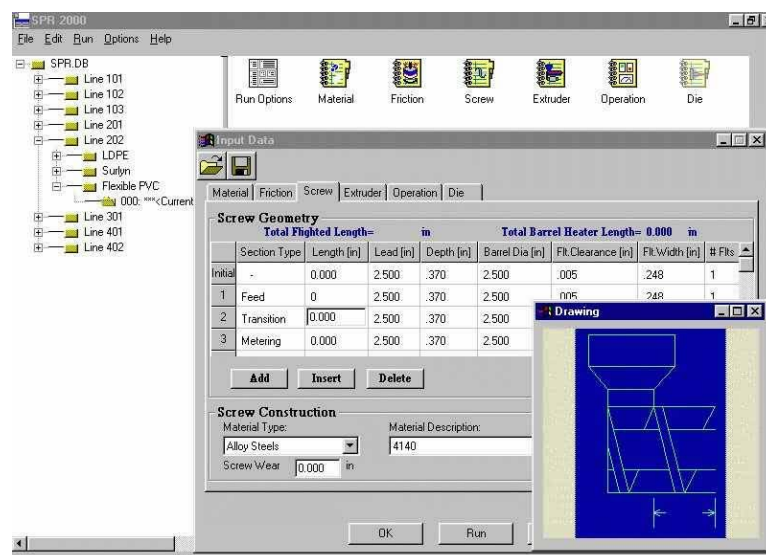
2.4.2 Extrud-2000

Herramienta de simulación de extrusión con capacidad de resolver problemas de extrusión de alta complejidad. En un típico trabajo de simulación el usuario alimenta el programa con información básica sobre la resina (como viscosidad vs.

velocidad de cizalladura, densidad, punto de fundición y propiedades térmicas), la cual se encuentra en una base de datos que contiene las propiedades de cerca de 5000 polímeros. También se introducen al programa las especificaciones físicas del cilindro y el tornillo, los parámetros de operación, etc. En total son cerca de 250 variables que pueden ser entregadas al programa y luego modificadas con facilidad y de manera rápida. La ilustración 5 muestra el entorno gráfico para el ingreso de la geometría del tornillo.

Los resultados del estudio de simulación son presentados en forma gráfica y pueden ser comparados con estudios previos; entre los parámetros entregados en forma gráfica se tienen la temperatura de la resina fundida, su presión, viscosidad, flujo de calor, consumo de potencia, etc, que suman más 100 representaciones posibles. Por otro lado, las hojas de cálculo proveen al usuario con la información presentada en forma tabular y que también puede ser comparada con los resultados de estudios de simulación previos. La información pertinente al tornillo es visualizada como si el cilindro fuera transparente; tal representación ayuda a detectar problemas potenciales sobre la calidad del producto.

Ilustración 5. Ingreso de la geometría del tornillo en Extrud-2000



En conclusión, los programas disponibles en el mercado a un alto costo, son capaces de predecir algunos de los parámetros más importantes evaluados en el desempeño de un tornillo como la capacidad de producción, el consumo de energía, el perfil de plastificación, entre otros, para un material y unas condiciones de operación dadas. Sin embargo, en nuestro medio, el diseño de un nuevo tornillo por lo general es un proceso de ensayo-error, en donde se cambian las condiciones geométricas y de funcionamiento del tornillo hasta obtener el funcionamiento deseado; es por esto que se hace necesario la creación de un software de dominio público que haga posible conocer el real funcionamiento de un tornillo de extrusión antes de su fabricación.

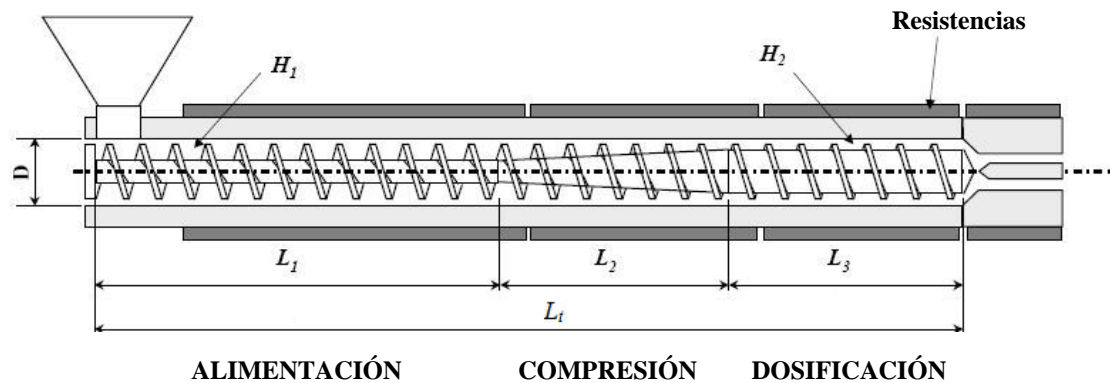
Este proyecto está orientado a la elaboración de un módulo que trabaja sobre un programa CAD, haciendo uso de las API's (Application Programable Interface) de SolidWorks que automatice y facilite el proceso de modelación de las condiciones de operación de un tornillo extrusor. Junto con estas memorias se entrega el módulo con su respectivo instalador y manual de instrucciones.

Se espera abrir las puertas a la incorporación de desarrollos CAE en la evaluación del funcionamiento de los tornillos de extrusión sin la necesidad de invertir en programas existentes a precios bastante elevados.

3. MODELADO DE TORNILLOS DE EXTRUSIÓN

Una extrusora convencional de termoplásticos está constituida principalmente por un tornillo de Arquímedes que se ajusta con precisión dentro de una camisa cilíndrica precalentada apenas con espacio suficiente para rotar. El tornillo tiene por lo menos tres secciones geométricas distintas (ilustración 6): la zona de alimentación; en donde la profundidad del canal es constante (H_1), la zona de compresión; donde la profundidad del canal varía a lo largo del eje y la zona de dosificación donde la profundidad del canal es de nuevo constante pero mucho más pequeña (H_2) (Lopes da Cunha, 1999, 60).

Ilustración 6. Extrusora convencional de termoplásticos.



Lopes da Cunha, 1999,60

Como se mencionó anteriormente, el objeto de este proyecto es el de simular las condiciones de operación del tornillo, para lo cual el usuario deberá ingresar algunos datos como lo son las características del polímero utilizado, la geometría del tornillo y las condiciones del proceso, para obtener predicciones en relación a la cantidad de flujo generado, presiones medias, consumo de energía entre otros. Lo anterior con el objeto de medir el desempeño del tornillo y evaluar posibles soluciones de optimización modificando los parámetros de entrada.

Para la generación de los resultados se solucionan modelos matemáticos en cada una de las zonas del tornillo. Estos modelos son descritos en este capítulo a medida que son aplicados sobre cada zona del tornillo. La aproximación numérica a la solución de los modelos se realiza a través lo que bien pueden ser diferencias finitas, mediante las cuales el tornillo es dividido en pequeñas zonas. Cada subdivisión o zona de cálculo, es representada mediante el uso de valores promedio en esa porción del tornillo.

Se asume que las propiedades del material son independientes de la presión y la temperatura, con excepción de la viscosidad. La densidad del lecho sólido, que en el caso de una extrusora real varía a lo largo de tornillo cuando el material es compactado y fundido, se asume como la densidad promedio del gránulo en fase sólida (Polydynamics @ 2005).

3.1 GEOMETRÍA DE UN EXTRUSOR

Antes de establecer las ecuaciones a utilizar, es necesario definir algunos de los componentes básicos de un tornillo de hélice sencilla. Estos términos se presentan en la ilustración 6 y se relacionan de la siguiente manera:

Ecuación 1. Factor L/D

$$L / D = \frac{L_t}{D}$$

Xaloy @ 2005

La definición del factor L/D (relación entre longitud y diámetro del tornillo) varía de un proveedor a otro. Algunos fabricantes lo definen como la porción “encerrada” del tornillo, o miden la longitud de la hélice desde el lado frontal del puerto de alimentación hasta el final del tornillo. Otros miden la longitud de la hélice desde el centro del puerto de alimentación, y otros miden la longitud “efectiva” (o toda la

longitud de la hélice). Un ejemplo que indica cómo determinar el factor L/D para un tornillo de 2,5" es:

Diámetro del tornillo = 2,5"

Longitud de la hélice = 63"

Entonces:

$$L/D = 63/2,5 = 25,2 \quad (\text{paso cuadrado})$$

Las relaciones L/D típicas son 24:1 y 30 ó 32:1, pero hay aplicaciones especiales donde los extrusores son de 10:1 L/D ó alcanzan 50:1 L/D. La relación adecuada se define por el proceso y aplicación que deba satisfacerse. (Xaloy @ 2005)

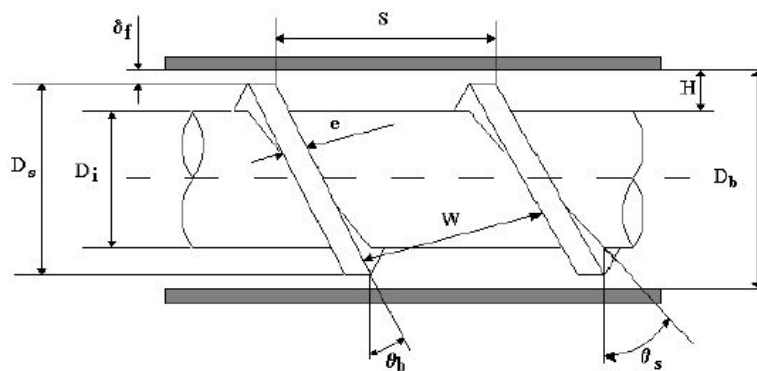
La ilustración 7 muestra una porción del husillo y del cilindro utilizada para definir la geometría de un tornillo extrusor. El diámetro interno del cilindro es D_b , los diámetros internos y externos del tornillo son D_i y D_s respectivamente. El paso es s y la profundidad del canal, H , es dada por:

Ecuación 2. Profundidad del canal.

$$H = \frac{D_b - D_i}{2}$$

(Lopes de Cunha, 1999, 61)

Ilustración 7. Geometría de un tornillo extrusor.



(Lopes da Cunha, 1999,62)

Refiriéndose a la ilustración 6, la sección de alimentación es el primer elemento del tornillo al que se le introduce polímero. En extrusores de agujero liso, ésta es la parte más profunda del tornillo (H_1). En los diámetros más pequeños (2,5" y menos) se debe prestar atención especial a esta sección para reducir el riesgo de falla por torsión debido a la sobrecarga de torque en el tornillo. Algunas veces es recomendable fabricar los tornillos pequeños en un material de alta resistencia a la cedencia, para reducir el riesgo de este tipo de falla. Como regla, la sección de alimentación de un tornillo no debe ser superior a: (Xaloy @ 2005)

Ecuación 3. Profundidad máxima del canal en la zona de alimentación.

$$H_{m\acute{a}x} = 0.2(D_s)$$

(Xaloy @ 2005)

El juego radial es δ_f . El ángulo de paso (θ) y el ancho del canal (W) varían en la dirección de giro (en la raíz del tornillo, θ_s y W_s , en la superficie del cilindro, θ_b y W_b) respectivamente:

Ecuación 4. Ángulo de paso en la raíz del tornillo.

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{S}{\pi D_i}\right)$$

(Lopes de Cunha, 1999, 61)

Ecuación 5. Ángulo de paso en la superficie del cilindro.

$$\theta_b = \arctg\left(\frac{S}{\pi D_s}\right)$$

(1999, 61)

Ecuación 6. Ancho del canal en la raíz del tornillo.

$$W_s = S \cos \theta_s - e$$

(1999, 61)

Ecuación 7. Ancho del canal en la superficie del cilindro

$$W_b = S \cos \theta_b - e$$

(1999, 61)

El ancho del filete, e , se mide en una dirección normal al filete (como el ancho del canal). La profundidad del canal varía en la zona de la compresión del tornillo, entre H_1 y H_2 :

Ecuación 8. Profundidad del canal H_2

$$H_2 = H_1 - AL_2$$

(1999, 62)

Donde A es la pendiente en la zona de compresión (Lopes da Cunha, 1999, 62).

La relación de compresión es probablemente el término más usado en la terminología de diseño de tornillos, aunque no por eso es el mejor aplicado ni el mejor comprendido. La mayoría de la gente acepta la definición de relación de compresión como el cociente entre la profundidad de la sección de alimentación y la profundidad de la sección de dosificación. Esto es lo que normalmente se denomina "Relación de Compresión de Profundidades", pero hay un medio más preciso para calcular la verdadera relación de compresión, y se define como "Relación de Compresión Volumétrica": (Xaloy @ 2005).

Ecuación 9. Relación de Compresión de Profundidades

$$CR = \frac{H_1}{H_2}$$

(Xaloy @ 2005)

Ecuación 10. Relación de Compresión de Volumétrica

$$VCR = \frac{H_1(s_1 - n_1e_1) \times (D_s - H_1)}{H_1(s_2 - n_2e_2) \times (D_s - H_2)}$$

(Xaloy @ 2005)

Donde n es el número de vueltas en las secciones de alimentación y dosificación.

La simulación computacional de tornillos de extrusión implica necesariamente la realización de simplificaciones asociadas a la geometría del tornillo y a las condiciones cinemáticas del mismo, entre las que se encuentran:

- Desenrollar el canal para tratarlo como una sección transversal rectangular y de esta manera utilizar coordenadas cartesianas. El error inducido por esta aproximación es muy pequeño, puesto que la profundidad del canal es mucho menor que el diámetro del tornillo. Por tanto, el ancho del canal y el ángulo de paso se convierten en constantes dadas por sus valores medios, respectivamente.

Ecuación 11. Ancho del canal medio

$$\bar{W} = \frac{W_b + W_s}{2}$$

(Lopes de Cunha, 1999, 63)

Ecuación 12. Angulo de paso medio

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_b + \theta_s}{2}$$

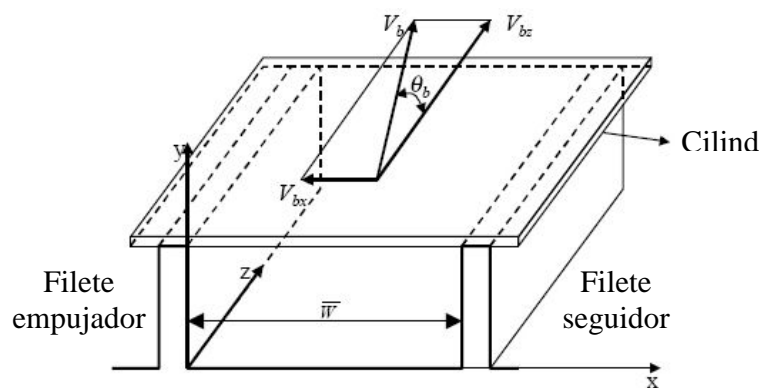
(1999, 63)

- El tornillo permanece inmóvil y el cilindro rota. Esta simplificación se adopta puesto que de esta manera es más fácil estudiar los fenómenos físicos presentados durante el proceso de extrusión. Tadmor y Klein evaluaron este supuesto para el flujo de material fundido en la zona de dosificación. Determinaron que el perfil tangencial de velocidad de un líquido newtoniano isotérmico que fluye entre dos cilindros concéntricos infinitamente largos es idéntico, independiente si cilindro que rota es el interno o el externo. Más recientemente, Rauwendall probó experimentalmente que este supuesto es acertado derivando las ecuaciones analíticas para un fluido newtoniano en una extrusora monohusillo utilizando dos sistemas geométricos (placa plana y cilíndrico) y dos condiciones cinemáticas (cilindro rotando y tornillo

rotando). Concluyó que las velocidades y los gradientes de la presión son exactamente iguales para el sistema cilíndrico y para el sistema de placas planas las diferencias son insignificantes dado que la profundidad del canal es muy pequeña en relación al diámetro del cilindro.

Por lo tanto se puede definir la velocidad del cilindro (V_b) y sus componentes (V_{bx} y V_{bz}) en un sistema cartesiano.

Ilustración 8. Componentes de velocidad en el cilindro.



(Lopes da Cunha, 1999,64)

Ecuación 13. Velocidad tangencial de la superficie del cilindro

$$V_b = \pi N D_b$$

(1999, 64)

Ecuación 14. Componente de V_b en dirección cruzada

$$V_{bx} = V_b \text{sen} \theta_b$$

(1999, 64)

Ecuación 15. Componente de V_b en dirección de flujo

$$V_{bz} = V_b \text{cos} \theta_b$$

(1999, 64)

Donde N es la velocidad del tornillo (1999, 64)

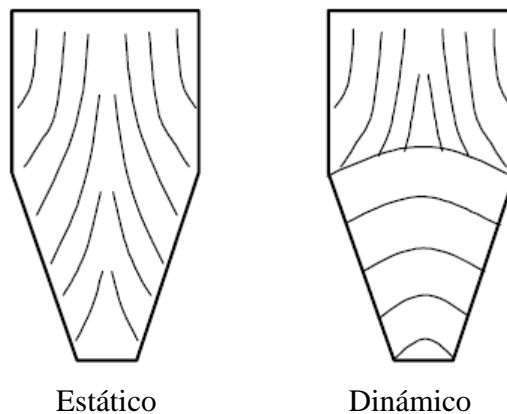
3.2 ZONA DE ALIMENTACIÓN

La principal función de la sección de alimentación de un tornillo es transportar sólidos. Su longitud debe alcanzar de ocho a diez diámetros. Una de las razones para tener mayores secciones de alimentación es hacer que se introduzca más calor a la forma sólida de la resina, haciendo que se adhiera al cilindro y de esta forma ayude en el desarrollo de la presión requerida para tener un buen transporte de sólidos. La zona de alimentación se extiende desde la tolva de la extrusora hasta el lugar, en el tornillo, en donde los primeros gránulos del polímero comienzan a fundirse.

3.2.1 Tolva

En la tolva de una extrusora los gránulos son transportados al tornillo por acción de la gravedad. Durante este proceso se desarrolla un campo de tensión en los gránulos, el cual depende de las condiciones de operación, los campos de tensión estáticos (tolva cerrada durante la carga inicial) o dinámicos (tolva abierta durante la descarga), ilustración 9. Generalmente, la tolva en los trabajos del proceso de extrusión permanece abierta. (1999, 64)

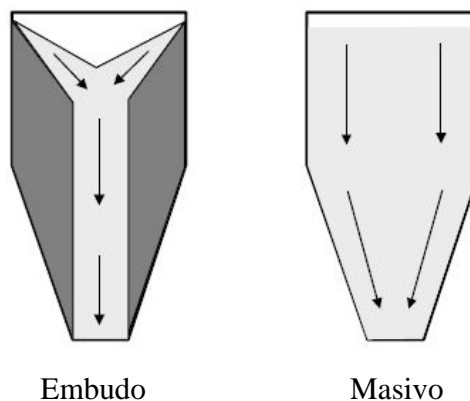
Ilustración 9. Campos de tensión estáticos y dinámicos.



(Lopes da Cunha, 1999,65)

En condiciones dinámicas ocurren dos tipos de flujo (ilustración 10). En el “flujo masivo” el total de gránulos se mueven hacia el alimentador, esto ocurre cuando las paredes de la tolva son lo suficientemente lisas. El “flujo embudo” ocurre cuando los gránulos se mueven hacia el alimentador por una especie de abertura central, debido a que el peso del material es soportado por las paredes de la tolva (Tadmor, 1979, 257).

Ilustración 10. Clases de flujo en condiciones dinámicas



(Lopes da Cunha, 1999,65)

3.2.1.1 Presión

La presión en la parte inferior de la tolva se considera a menudo como la condición inicial para los cálculos en la zona de alimentación. Puede ser estimada realizando un equilibrio de fuerzas en una sección horizontal de gránulos de polímero.

Ecuación 16. Presión generada por el material en una tolva cilíndrica.

$$P_1 = \frac{R_h \rho g}{2fK'} [1 - \exp(-2fYK'/R_h)]$$

(Tadmor, 1970, 67)

Ecuación 17. Rata de presión actuando lateralmente.

$$K' = \frac{1 - \text{sen} \alpha_m}{1 + \text{sen} \alpha_m}$$

(Tadmor, 1970, 67)

3.2.2 Tornillo

La zona de alimentación debe recibir más atención que las zonas de compresión y dosificación. Esto se debe a la imposibilidad de realizar algunas simplificaciones en esta sección, asociadas a que el lecho sólido no se comporta como un bloque de material, así como también la dificultad que existe para determinar algunas propiedades físicas del polímero, entre ellas la densidad y los coeficientes de fricción, dependientes de variables como la temperatura, la velocidad y la presión.

Uno de los primeros modelos de esta zona fue realizado por Darnell, quien asumió que el flujo de sólidos (el movimiento de un lecho sólido elástico no deformable) resulta de la diferencia entre las fuerzas de la fricción que actúan sobre la superficie del tornillo y la superficie del cilindro. Estudios subsecuentes han extendido este análisis y considerado el movimiento debido a los esfuerzos de cizalladura en las películas de polímero fundido que rodean el lecho sólido en condiciones no isotermas. El modelo desarrollado por Tadmor merece una nota especial, ya que el análisis de Darnell fue extendido para incluir los efectos térmicos que ocurren en el lecho sólido, particularmente los más cercanos a las superficies del tornillo y del cilindro.

Recientemente se realizaron nuevos estudios teóricos y experimentales relacionados con la zona de alimentación. Algunos autores después de verificar experimentalmente que los gránulos no se comportan generalmente como un fluido coherente desarrollaron un modelo teórico basado en elementos finitos, que introduce también cuatro nuevos parámetros difíciles de determinar en la práctica. El grupo de Spalding y de Hyun desarrolló un modelo no isotérmico para alimentación forzada y por gravedad. Los resultados obtenidos con este modelo se compararon con datos experimentales en un dispositivo diseñado para medir la cantidad de gránulos transportados en función de la temperatura, velocidad y presión. Campbell propuso un modelo asumiendo que el lecho sólido se comporta como líquido elástico pero aun no ha sido validado. Finalmente, Spalding

desarrolló métodos que permiten cuantificar la densidad de los gránulos y de los coeficientes de la fricción en función de la temperatura, la velocidad y la presión, que se están probando con varios polímeros.

Dadas las limitaciones para el uso de los nuevos modelos, el gradiente de presión y el consumo de energía serán adoptados de los análisis de Broyer y de Tadmor. (Lopes da Cunha, 1999, 66).

3.2.2.1 Caudal

De consideraciones geométricas simples, el caudal de salida está dado por:

Ecuación 18. Flujo volumétrico.

$$Q = \pi^2 N H D_b (D_b - H) \frac{\tan \phi \tan \theta_b}{\tan \phi + \tan \theta_b} \left[1 - \frac{pe}{\pi (D_b - H) \overline{\text{sen} \theta}} \right]$$

(Lopes da Cunha, 1999,66)

Donde ϕ es el ángulo de transporte del gránulo y está dado por:

Ecuación 19. Ángulo ϕ .

$$\phi = \arctan \left(\frac{s}{\pi D_s} \right)$$

(Polydynamics, Inc)

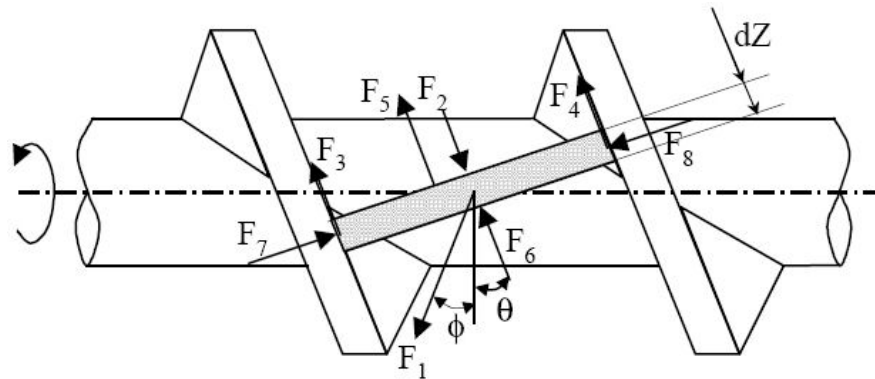
3.2.2.2 Presión

Broyer y Tadmor asumieron las siguientes simplificaciones:

- Los gránulos se comportan como una pasta polimérica continua
- La pasta entra en contacto perfectamente con los canales del tornillo y el cilindro
- Se omite el juego radial
- Los coeficientes de fricción son constantes
- La densidad del polímero se asume constante
- Se omiten las fuerzas gravitacionales y de inercia.

La densidad y los coeficientes de fricción pueden variar con la temperatura, la presión y la velocidad si los cálculos se realizan sobre pequeños incrementos del canal. (1999, 66)

Ilustración 11. Fuerzas que actúan sobre un elemento diferencial



(Lopes da Cunha, 1999,67)

El perfil de presión se obtiene de los balances de fuerza y torsión hechos sobre un elemento diferencial en el canal, según las indicaciones de la ilustración 6. Las fuerzas incluída la fricción (\$F_1\$) entre el cilindro y el lecho sólido (formando un ángulo \$\theta+\Phi\$ en la dirección de rotación del canal), la fricción debido al contacto de los gránulos con la raíz del tornillo (\$F_5\$) y las paredes del tornillo (\$F_3\$ y \$F_4\$), respectivamente, las reacciones normales (\$F_7\$ y \$F_8\$), y las fuerzas debido al gradiente de la presión (\$F_6\$ y \$F_2\$). (1999, 67)

El incremento en la presión está dado por:

Ecuación 20. Perfil de presión en la zona de alimentación.

$$P_2 = P_1 \exp \left[\int_{z_1}^{z_2} \left(\frac{B_1 - A_1 K}{B_2 + A_2 K} \right) dz \right]$$

(Lopes da Cunha, 1999,67)

Donde P_1 y P_2 son presiones distanciadas por z_1 y z_2 , respectivamente. A_1 , A_2 , B_1 , B_2 y K son constantes dadas por:

Ecuación 21. Constante A1 para la presión.

$$A_1 = f_b W_b \text{sen} \phi + 2H f_s \text{sen} \theta_b + W_s f_s \text{sen} \theta_b$$

(Tadmor, 1970,61)

Ecuación 22. Constante A2 para la presión.

$$A_2 = H\bar{W} \text{sen} \bar{\theta}$$

(Tadmor, 1970,61)

Ecuación 23. Constante B1 para la presión.

$$B_1 = f_b W_b \cos \phi - 2H f_s \text{sen} \theta_b \cot g \bar{\theta} \frac{\bar{D}}{D_b} - W_s f_s \text{sen} \theta_b \cot g \theta_s \frac{D_s}{D_b}$$

(Tadmor, 1970,62)

Ecuación 24. Constante B2 para la presión.

$$B_2 = H\bar{W} \cos \bar{\theta} \frac{\bar{D}}{D_b}$$

(Tadmor, 1970,62)

Ecuación 25. Constante K para la presión.

$$K = \frac{\bar{D}}{D_b} \frac{\text{sen} \bar{\theta} + f_s \cos \bar{\theta}}{\cos \bar{\theta} - f_s \text{sen} \bar{\theta}}$$

(Tadmor, 1970,62)

3.2.2.3 Consumo de Potencia

El consumo de energía mecánica en la zona de alimentación (e_w) es el producto de la velocidad del cilindro en la dirección de Φ por la fuerza de la fricción en la superficie del cilindro. Esta última es el producto de la presión local por el área interfacial entre el lecho sólido y el cilindro ($P_2 f_b W_b dz$).

Ecuación 26. Consumo de energía mecánica en la zona de alimentación.

$$e_w = e_{wb} + e_{ws} + e_{wf} + e_{wp}$$

(Lopes da Cunha, 1999,68)

Donde e_{wb} , e_{ws} , e_{wf} y e_{wp} son la energía mecánica disipada en la superficie del cilindro, en la raíz del tornillo, en los filetes y en la compresión respectivamente. Las expresiones correspondientes son:

Ecuación 27. Energía mecánica disipada en la superficie del cilindro.

$$e_{wb} = \pi N D_b f_b W_b P_m \Delta z \frac{\text{sen} \theta_b}{\text{sen}(\theta_b + \phi)}$$

(Lopes da Cunha, 1999,68)

Ecuación 28. Energía mecánica disipada en la raíz del tornillo.

$$e_{ws} = \pi N D_s f_s W_b P_m \Delta z \frac{\text{sen} \theta_b}{\text{sen}(\theta_b + \phi)} \frac{\text{sen} \theta_b \text{tg} \theta_b}{\text{sen} \theta_s \text{tg} \theta_s} r_1$$

(Lopes da Cunha, 1999,68)

Ecuación 29. Energía mecánica disipada en los filetes.

$$e_{wf} = \pi N D_b f_s W_b P_m \Delta z \frac{\text{sen} \phi}{\text{sen}(\theta_b + \phi)} \frac{\text{sen} \theta_b}{\text{sen} \bar{\theta}} \left[\begin{array}{l} 2H \frac{\text{sen} \theta_b}{\text{sen} \bar{\theta}} + \\ f_b W_b \left(\text{sen} \phi \cos \bar{\theta} + \frac{D_b}{D} \cos \phi \text{sen} \bar{\theta} \right) + \\ W_s f_s \text{sen} \theta_b \cos \bar{\theta} \left(1 - \cot g \theta_s \text{tg} \bar{\theta} \frac{D_s}{D} \right) \end{array} \right]$$

(Lopes da Cunha, 1999,68)

Ecuación 30. Energía mecánica disipada en la compresión.

$$e_{wp} = \pi N D_b H \bar{W} \frac{\text{sen} \phi}{\text{sen}(\theta_b + \phi)} \frac{\text{sen} \theta_b}{\text{sen} \bar{\theta}} P_m \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

(Lopes da Cunha, 1999,68)

Donde P_m y r_1 son:

Ecuación 31. Factor P_m .

$$P_m = \frac{P_2 - P_1}{\ln \frac{P_2}{P_1}}$$

(Lopes da Cunha, 1999,68)

Ecuación 32. Factor r_1 .

$$r_1 = \frac{1 - \frac{e}{S \cos \theta_s}}{1 - \frac{e}{S \cos \theta_b}}$$

(Lopes da Cunha, 1999,69)

3.3 ZONA DE COMPRESIÓN

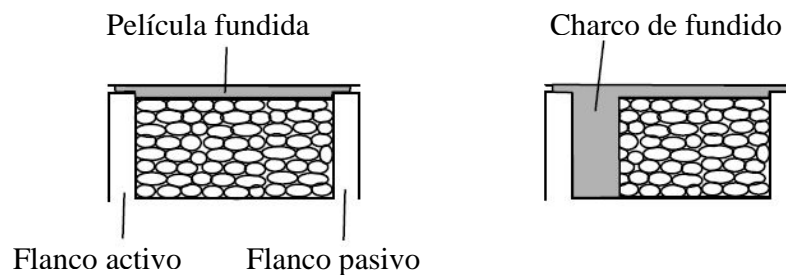
La sección de compresión o transición en un tornillo convencional es donde tiene lugar la mayor parte de la fusión del polímero. Esta es la porción del tornillo que trasciende desde la profundidad de alimentación hasta la profundidad de dosificación, y es donde se efectúa trabajo sobre la resina, haciendo que se produzca la fusión. En esta sección del tornillo, la raíz se vuelve gradualmente menos profunda, forzando al material hacia delante de la pared del cilindro, donde la fusión se lleva a cabo.

El fundido de los gránulos no comienza sino a partir de terminación de la zona de alimentación (es decir, cuando el polímero sólido más cercano a superficie del cilindro alcanza la temperatura de plastificación). Maddock y Tadmor divulgaron un proceso de dos etapas (ilustración 12):

- El polímero que está en contacto con la superficie del cilindro funde primero y forma una película la interfaz cilindro-sólido del polímero. Esta película aumenta gradualmente su espesor.

- Posteriormente, un “charco de fundido” aparece cerca filete del tornillo y crece hasta que el polímero entero plastifica.

Ilustración 12. Proceso de fusión de Maddock y Tadmor

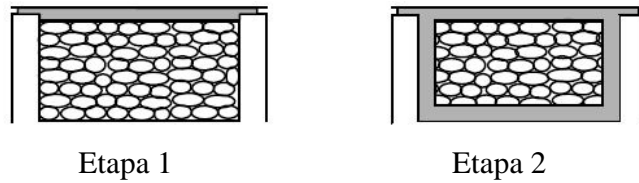


(Lopes da Cunha, 1999,75)

El fundido inicial en lugar de acumular material cerca del filete, penetra y llena los vacíos entre los gránulos, retrasando la formación de la película. Después de la formación de la película, comienza la fusión definitiva, en el momento en que el espesor de la película excede el juego radial. Cuando esto ocurre, la película presiona al lecho sólido contra el tornillo favoreciendo la plastificación.

Dependiendo de las condiciones de funcionamiento, particularmente la temperatura del tornillo, es posible que los gránulos más cercanos a la superficie del tornillo, filetes y raíz alcancen su punto de fusión durante esta zona. Allí mismo se presenta disipación por fricción, y por consiguiente un aumento gradual en la temperatura del polímero sólido. Por lo tanto, las dos etapas que se presentan en la zona de compresión (ilustración 13), consisten en formar una película de fundido cerca en la superficie del cilindro y luego extenderse hacia las superficies del tornillo hasta fundir por completo el polímero (1999, 75).

Ilustración 13. Etapas en la zona de compresión.

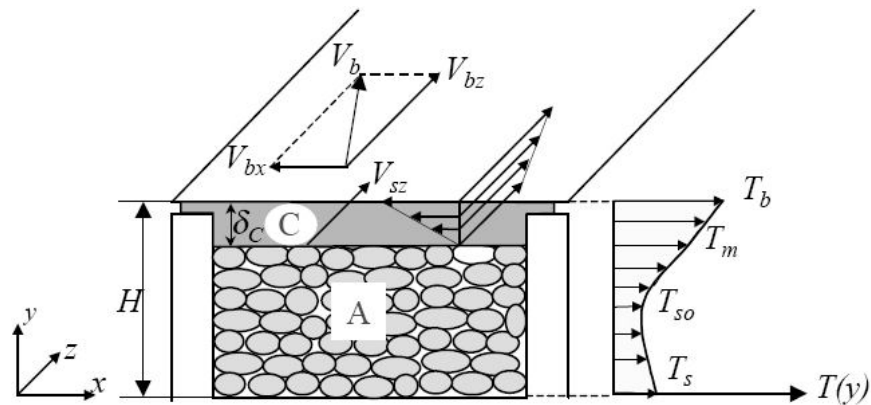


(Lopes da Cunha, 1999,75)

3.3.1. Etapa 1

Según la ilustración 13, el lecho sólido entra en contacto con las paredes y la raíz del tornillo, donde la temperatura aumenta debido a la disipación de calor generado por fricción. Esta etapa finaliza cuando el polímero sólido alcanza su punto de fusión. Simultáneamente, el polímero sólido continúa su plastificación en la interfaz película-lecho sólido (el cilindro precalentado y los intensos esfuerzos de cizalladura contribuyen a este proceso).

Ilustración 14. Sección transversal de la Etapa 1



(Lopes da Cunha, 1999,76)

Se establecen las siguientes suposiciones:

- El lecho sólido es un *continuo* isotrópico y homogéneo
- Se desprecia el derramamiento de fluido en las extremidades del filete

- El polímero fundido es un líquido viscoso inelástico
- El flujo es constante
- La interfase sólido-fundido es lisa
- El flujo de la película es completamente desarrollado (es decir, $\partial V_x / \partial x = 0$ y $\partial V_z / \partial z = 0$)
- Se desprecian las fuerzas gravitacionales y de inercia.

3.3.1.1. Gradiente de presión

Los balances de fuerza y torsión, similares a los realizados para la zona de alimentación, permiten el cómputo del perfil de presión. La diferencia radica en que una fuerza viscosa sustituye la fuerza de fricción en la pared del cilindro:

Ecuación 33. Perfil de presión para la zona de compresión con profundidad de canal constante.

$$P = P_0 \exp \left[\frac{B_1' + A_1' K}{B_2 + A_2 K} \Delta z \right] + \frac{\tau W_b (\cos \bar{\theta} - K \sin \bar{\theta})}{B_1' + A_1' K} \left\{ \exp \left[\frac{B_1' + A_1' K}{B_2 + A_2 K} \Delta z \right] - 1 \right\}$$

(Lopes da Cunha, 1999,81)

donde τ es el esfuerzo de cizalladura y:

Ecuación 34. Constante A1' para la presión.

$$A_1' = \bar{W} \tan \alpha \sin \bar{\theta} + 2.H f_s \sin \theta_b + W_s f_s \sin \theta_b \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{f_s} \right)$$

(Lopes da Cunha, 1999,81)

Ecuación 35. Constante B1' para la presión.

$$B_1' = \bar{W} \tan \alpha \cos \bar{\theta} \frac{\bar{D}}{D_b} - 2.H f_s \sin \theta_b \cot \bar{\theta} \frac{\bar{D}}{D_b} - W_s f_s \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{f_s} \right) \sin \theta_b \cot \theta_s \frac{D_s}{D_b}$$

(Lopes da Cunha, 1999,81)

A_2 , B_2 y K están definidos en las ecuaciones 22, 24 y 25, respectivamente, y el esfuerzo de cizalladura medio $\bar{\gamma}$, usado para encontrar τ es:

Ecuación 36. Esfuerzo de cizalladura medio.

$$\bar{\gamma} = \frac{V_b \operatorname{sen} \theta_b}{\delta_c \operatorname{sen}(\theta_b + \phi)}$$

(Lopes da Cunha, 1999,82)

3.3.1.2. Consumo de energía

El consumo de energía mecánica se puede calcular siguiendo el procedimiento desarrollado para la zona de alimentación, pero reemplazando la fricción con el cilindro por una película fundida. Entonces, la ecuación 25 se convierte a:

Ecuación 37. Esfuerzo de cizalladura medio.

$$e_w' = e_{wb}' + e_{ws} + e_{wf} + e_{wp}$$

(Lopes da Cunha, 1999,82)

donde e_{wb}' es la energía disipada en la superficie del cilindro, dada por:

Ecuación 38. Esfuerzo de cizalladura medio.

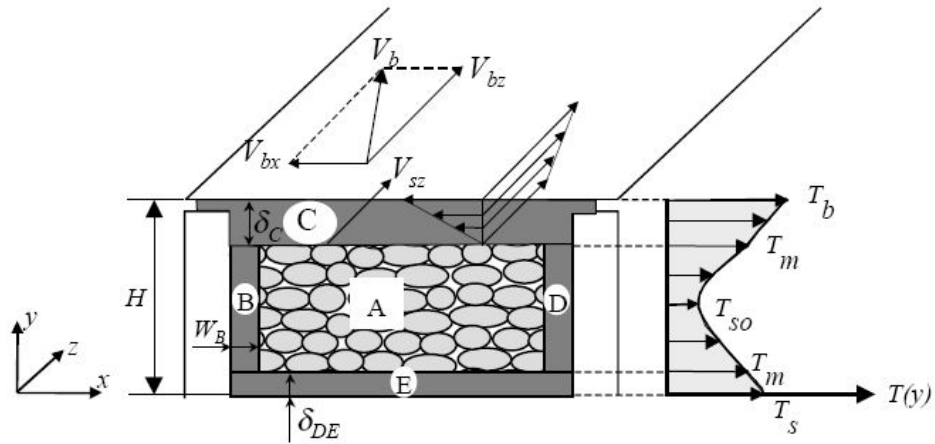
$$e_{wb}' = \pi N D_b \tau W_b Z_b \frac{\operatorname{sen} \theta_b}{\operatorname{sen}(\theta_b + \phi)}$$

(Lopes da Cunha, 1999,82)

3.3.2 Etapa 2

Esta etapa corresponde a la zona de plastificación estudiada por Chung, quien desarrolló un modelo que predice el perfil de presión asumiendo condiciones isotérmicas. El lecho sólido (A) es rodeado por películas fundidas adyacentes a la pared del cilindro (C), la raíz del tornillo (E) y los filetes del tornillo (B activo) y (D arrastrarse). La etapa 2 se diferencia de la zona de dosificación únicamente en el tamaño del fundido B como se verá más adelante.

Ilustración 15. Sección transversal de la Etapa 2



(Lopes da Cunha, 1999,82)

Kacir y Tadmor desarrollaron un modelo teórico para esta etapa que permite el cálculo del espesor de la película, la generación de la presión y el consumo de energía.

3.3.2.1. Perfil del lecho sólido.

El espesor del lecho sólido X , se calcula mediante incrementos en la dirección del canal, z . La relación entre ellos se obtiene a partir de un balance de masas para el lecho sólido en la dirección del canal, despreciando el cambio de espesor de la película y asumiendo una velocidad y profundidad constante en la dirección del canal.

Ecuación 39. Perfil del lecho sólido con profundidad de canal constante.

$$\frac{X}{W} = \frac{X_1}{W} \left(1 - \frac{\Phi(z - z_1)}{2\rho_s V_{sz} H X_1^{\frac{1}{2}}} \right)^2$$

(Tadmor, 1970, 118)

Ecuación 40. Factor Φ .

$$\Phi = \left\{ \frac{V_{bx} \rho_m \left[k_m (T_b - T_m) + \frac{\mu}{2} V_j^2 \right]}{2[c_s (T_m - T_s) + \lambda]} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

(Tadmor, 1970, 118)

Las ecuaciones de momentum y energía son las siguientes:

Ecuación 41. Ecuaciones de momentum y energía.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial V_z}{\partial y} \right)$$

$$\rho_m c_p V_z(y) \frac{\partial T}{\partial z} = k_m \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \eta \dot{\gamma}^2$$

(Lopes da Cunha, 1999,77)

Donde ρ_m es la densidad del fundido, c_p es el calor específico del fundido, k_m es la conductividad térmica del fundido y η es la viscosidad del fundido, que será calculada utilizando la ley de Power-Law:

Ecuación 42. Viscosidad del fundido.

$$\eta = k_0 \exp[-a(T - T_0)] \dot{\gamma}^{n-1}$$

(Lopes da Cunha, 1999,77)

k_0 , a , T_0 y n son constantes y $\dot{\gamma}$ es el esfuerzo de cizalladura, dado por:

Ecuación 43. Esfuerzo de cizalladura.

$$\dot{\gamma} = \left[\left(\frac{\partial V_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(Lopes da Cunha, 1999,77)

Ecuación 44. Condiciones de frontera.

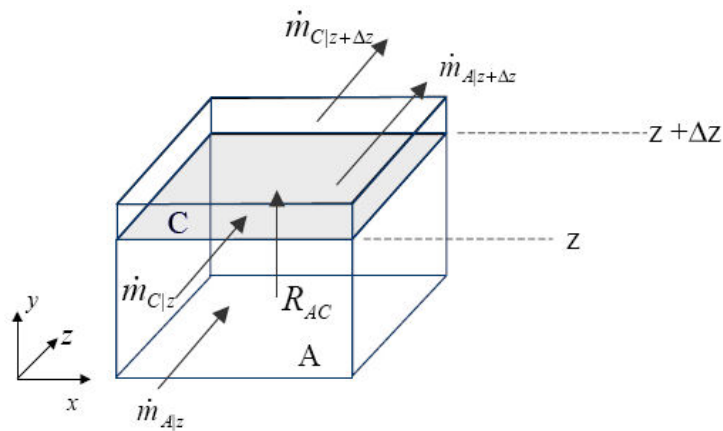
$$\begin{cases} V_x(y=0) = 0 \\ V_x(y=\delta) = -V_{bx} \end{cases} \quad \begin{cases} V_z(y=0) = V_{sz} \\ V_z(y=\delta) = V_{bz} \end{cases} \quad \begin{cases} T(y=0) = T_m \\ T(y=\delta) = T_b \end{cases}$$

(Lopes da Cunha, 1999,77)

Donde T_m es la temperatura de fusión.

El comportamiento de la película fundida y del lecho sólido se puede asociar a través de balances de masa y calor en la interfase. El flujo másico en la película fundida ($\dot{m}_{C|z+\Delta z}$) es determinado por la rata de fusión de material sobre la interfase (R_C): véase la ilustración 13, que representa una porción de la interfase entre la película fundida, C, y el lecho sólido A (véase también la ilustración 14).

Ilustración 16. Balances de masa sobre la interfase sólido-fundido.



(Lopes da Cunha, 1999,81)

Ecuación 45. Flujo másico de película fundida.

$$\dot{m}_{C|z+\Delta z} = \dot{m}_{C|z} + R_C$$

(Lopes da Cunha, 1999,80)

Donde:

Ecuación 46. Flujo másico de película fundida en dirección del canal.

$$\dot{m}_{C|z} = W_c \rho_m \int_0^{\delta_c} V_z(y) dy$$

(Lopes da Cunha, 1999,80)

Ecuación 47. Rata de fusión de material sobre la interfase.

$$R_C = \rho_s V_{sy} \Delta z W_c$$

(Lopes da Cunha, 1999,80)

Donde ρ_s es la densidad del lecho sólido y los índices $C|z$ y $C|z+\Delta z$ se refieren a los incrementos en la dirección del canal respectivamente (en la zona C) z y $z+\Delta z$.

El flujo másico en el lecho sólido ($\dot{m}_{A|z+\Delta z}$) es:

Ecuación 48. Flujo másico en el lecho sólido.

$$\dot{m}_{A|z+\Delta z} = \dot{m}_{A|z} + R_C$$

(Lopes da Cunha, 1999,80)

Donde:

Ecuación 49. Flujo másico de lecho sólido en dirección del canal.

$$\dot{m}_{A|z} = \rho_s V_{sz} (H_{s|z} W_s)$$

(Lopes da Cunha, 1999,80)

$H_{s|z}$ es la altura del lecho sólido. Entonces, el flujo másico total (\dot{m}_T) es:

Ecuación 50. Flujo másico en la zona de compresión.

$$\dot{m}_T = \dot{m}_{A|z+\Delta z} + \dot{m}_{C|z+\Delta z}$$

(Lopes da Cunha, 1999,81)

3.4 ZONA DE DOSIFICACIÓN

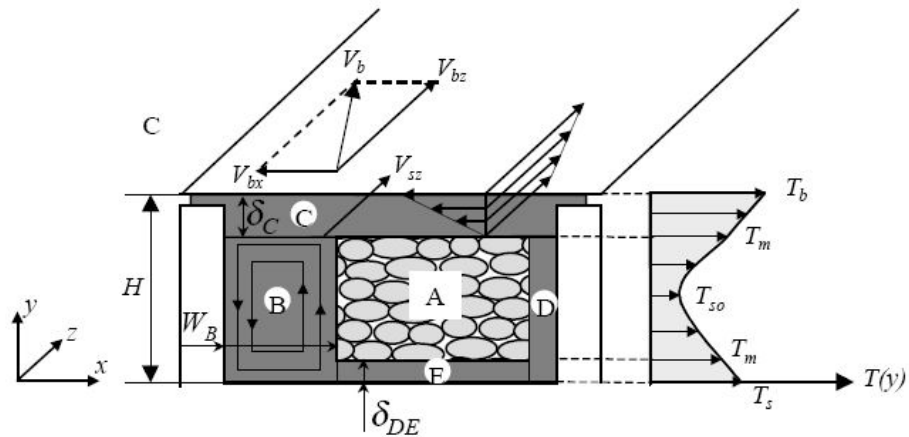
La sección de dosificación o bombeo en el tornillo es donde se completa la fusión del polímero, y donde se genera presión para superar la restricción impuesta por el cabezal. Una representación esquemática del mecanismo de plastificación en una sección transversal rectangular del tornillo se muestra en la ilustración 17.

Para el modelado de esta zona se asume que:

- El lecho sólido es un *continuo* isotrópico y homogéneo
- Se desprecian las fugas de fundido sobre las extremidades de los filetes
- El polímero fundido es un líquido puramente viscoso
- El flujo es constante
- Las interfases sólido-fundido son lisas
- El flujo de películas fundidas es completamente desarrollado en las todas las direcciones (es decir, $\partial V_x / \partial x = 0$ y $\partial V_z / \partial z = 0$)

- Se desprecian las fuerzas gravitacionales y de inercia
- La velocidad del lecho sólido es constante

Ilustración 17. Sección transversal de la plastificación



(Lopes da Cunha, 1999,83)

Las ecuaciones de momentum y energía para las películas C, D y E son idénticas. La región D se puede considerar como extensión de la región E. El flujo y comportamiento térmico de las regiones C y DE se puede describir por la ecuación 41 con las siguientes condiciones de frontera:

Ecuación 51. Condiciones de frontera para la película C.

$$\begin{cases} V_x(y=0) = 0 \\ V_x(y=\delta_C) = -V_{bx} \end{cases} \quad \begin{cases} V_z(y=0) = V_{sz} \\ V_z(y=\delta_C) = V_{bz} \end{cases} \quad \begin{cases} T(y=0) = T_m \\ T(y=\delta_C) = T_b \end{cases}$$

(Lopes da Cunha, 1999,84)

Ecuación 52. Condiciones de frontera para las películas D y E.

$$\begin{cases} V_x(y=0) = 0 \\ V_x(y=\delta_{DE}) = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} V_z(y=0) = 0 \\ V_z(y=\delta_{DE}) = V_{sz} \end{cases} \quad \begin{cases} T(y=0) = T_s \\ T(y=\delta_{DE}) = T_m \end{cases}$$

(Lopes da Cunha, 1999,84)

Cuando el ancho del “charco de fundido” (W_B) es igual o mayor que la profundidad del canal del tornillo, se produce la llamada “recirculación”, es decir $\partial V_z / \partial y \neq 0$. Si

esto no ocurre, B se comportará como C. Durante la plastificación, las ecuaciones de energía y momentum en dirección z toman la forma:

Ecuación 53. Ecuaciones de energía y momentum en dirección z.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial V_z}{\partial y} \right)$$

$$\rho_m c_p V_z(y) \frac{\partial T}{\partial z} = k_m \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \eta \dot{\gamma}^2$$

(Lopes da Cunha, 1999,84)

Donde la rata de cizalladura está dada por:

Ecuación 54. Rata de cizalladura durante la plastificación.

$$\dot{\gamma} = \left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(Lopes da Cunha, 1999,85)

Ecuación 55. Condiciones de frontera durante la plastificación.

$$\begin{cases} V_x(y=0) = 0 \\ V_x(y=H) = -V_{bx} \end{cases} \quad \begin{cases} V_z(x=0) = 0 \\ V_z(x=W_B) = V_{sz} \\ V_z(y=0) = 0 \\ V_z(y=H) = V_{bz} \end{cases} \quad \begin{cases} T(x=0) = T_s \\ T(x=W_B) = T_m \\ T(y=0) = T_s \\ T(y=H) = T_b \end{cases}$$

(Lopes da Cunha, 1999,85)

4. LA INTERFASE DE PROGRAMACIÓN DE APLICACIONES (API) DE SOLIDWORKS

Solidworks es un software especializado en CAD 3D que incluye diseño, análisis, colaboración y software de validación en un sólo paquete.

Al igual que otros software incluido el Microsoft Office, Solidworks ofrece la posibilidad de ser programado por medio de “Visual Basic for Applications” a través de lo que se ha llamado la API (Application Programming Interfase). Esta característica sumada a la posibilidad de vincular este proyecto con otros realizados anteriormente y en vía de ejecución por parte de estudiantes de la Universidad EAFIT, convergieron en la decisión de optar por este programa como base para el desarrollo de este trabajo.

La interfase de Visual Basic no es más que un conjunto muy grande de funciones o procedimientos que se encargan de efectuar todas las tareas rutinarias del programa. Las funciones de la API no son muy diferentes de las funciones estándar que acompañan a VBA y no existe casi ningún comando de SolidWorks que no se pueda controlar desde este; además, se pueden programar junto con los bucles lógicos o ciertos eventos que sean determinados por un objeto o por la misma aplicación. La facilidad que Visual Basic ofrece para manejar SolidWorks radica en que estas funciones interactúan directamente como macros de Visual Basic y no se tienen que agregar ni declarar las variables para el funcionamiento de una aplicación determinada. (Hernández, 1991, 232).

La aplicación desarrollada (análisis y modelación de tornillos de extrusión de termoplásticos) requería una herramienta de fácil manejo y programación con la cual se pudiera efectuar una gran cantidad de cálculos siguiendo los modelos matemáticos encontrados en la bibliografía.

5. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN.

La elaboración de esta herramienta computacional está basada en un proyecto de grado que implementó el modelado de diferentes tornillos de extrusión mediante el uso de una interfaz grafica amigable con el usuario.

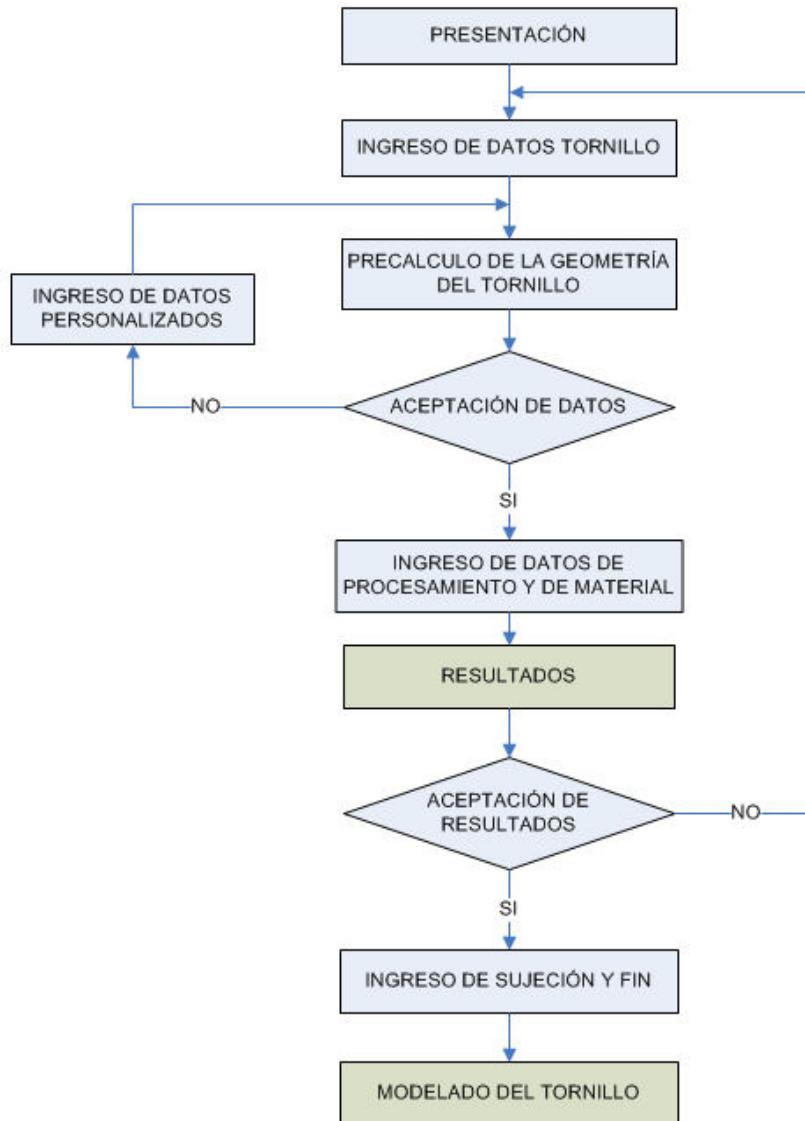
El programa parte del ingreso de unos pocos datos relacionados con la geometría del tornillo y mediante el uso de ecuaciones sugiere los valores del resto de variables presentes en el tornillo. El usuario puede aceptar o no esta sugerencia ya que manualmente existe la posibilidad de ingresar la totalidad de variables, para lo cual se debe haber realizado previamente una medición exhaustiva del tornillo.

Luego se pide al usuario que ingrese las condiciones de operación de la extrusora que aloja al husillo a evaluar y finalmente son requeridas las condiciones propias del material a extruir. Cabe resaltar que es de especial atención el ingreso de estas propiedades ya que el más mínimo error en ellas induce a grandes variaciones en los resultados, sobretodo en ecuaciones tan sensibles como las de la presión que dependen del incremento exponencial de un número (Ecuación 20). Finalmente, previa aprobación del usuario y después de mostrar los resultados obtenidos se presenta la opción de modelar el tornillo resultante.

5.1 ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA

Como se muestra en la ilustración 17, la aplicación está compuesta por dos paquetes: modulo de análisis y modulo de modelado. Ambos módulos dependen del modulo de geometría, pero el de análisis es también dependiente del módulo de procesamiento. Al final se presenta una ventana con los resultados obtenidos y se modela el tornillo evaluado.

Ilustración 18. Algoritmo global del programa.

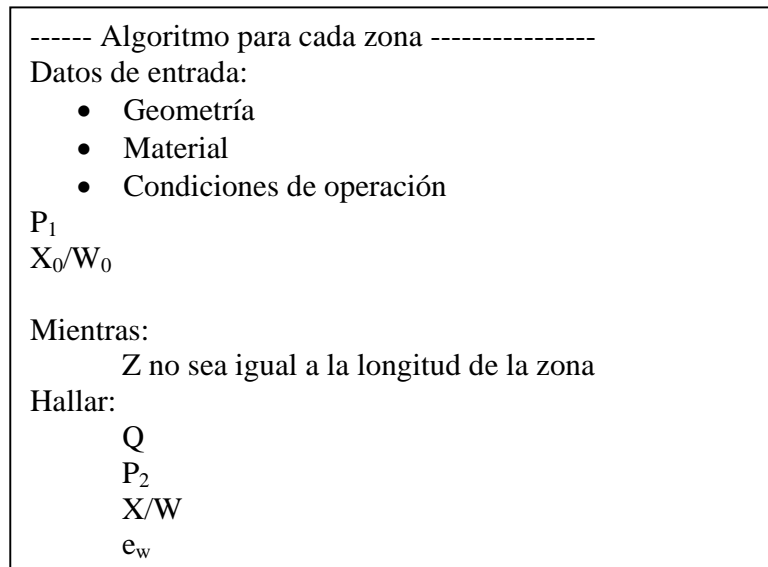


5.2 ALGORITMO DE CÁLCULO

El algoritmo de cálculo para el perfil de presión, de plastificación y de consumo de potencia en general es igual para todas las zonas. En la zona de alimentación ingresan los datos del usuario, se realizan una serie de cálculos hasta que finaliza

esta zona, luego estos últimos son los datos de entrada para la zona de compresión y luego se repite el ciclo con la zona de dosificación (ilustración 18).

Ilustración 19. Algoritmo global del programa.



Los datos de entrada comprenden la geometría del sistema, las características físicas y térmicas del polímero y las condiciones de operación de la extrusora. La presión inicial del sistema se asume como la presión constante que ejerce la tolva calculada con la ecuación 16 . Los cálculos para cada zona se hacen a lo largo de incrementos pequeños en Z hasta alcanzar la longitud de la zona. En esa localización se conoce el caudal, la presión, el consumo de energía, y el perfil de plastificación, los cuales se convierten en los datos iniciales para las zonas subsecuentes.

6. APLICACIÓN “EXTRUANÁLISIS” – EJEMPLO PRÁCTICO

El software desarrollado, ExtruAnálisis, está diseñado para trabajar bajo la plataforma de SolidWorks en las versiones 2004, 2005 y la más reciente 2006, lo que garantiza que la aplicación no corre riesgos de obsolescencia tecnológica por lo menos en el mediano plazo, al igual que permite trabajar sobre ella con el fin de generar mas módulos y complementar este proyecto.

El sistema operativo debe ser Microsoft Windows y se debe contar con una versión de Microsoft Office, preferiblemente la versión reciente, ya Visual Basic for Applications es un complemento con el que cuenta Microsoft Excel y sus desarrolladores involucran constantes cambios entre diferentes versiones.

6.1 INSTALACIÓN

ExtruAnálisis se encuentra comprimido en el archivo Install.exe que se encuentra en el CD anexo a este proyecto. Para su instalación basta con introducir el CD y automáticamente aparecerá la pantalla de instalación. (Ilustracion 19)

El proceso de instalación es similar al de cualquier otro programa bajo el entorno Windows. El instalador ubicará por defecto la carpeta de archivos de la aplicación en el disco C.

Para que aparezca la pantalla inicial del programa el usuario deberá ejecutar la macro EA.swp desde el menú Herramientas/Macro/Ejecutar Macro. El archivo esta ubicado en C:/Extruanalysis/EA.swp. Al finalizar este procedimiento estará disponible la pantalla de bienvenida a ExtruAnálisis.

6.2 EJECUCIÓN DE LA APLICACIÓN .EXTRUANÁLISIS.

Antes de iniciar, el usuario se debe abrir un parte nueva en Solidworks, esto garantiza el correcto funcionamiento de la aplicación. Al presionar el botón de ExtruAnálisis ubicado en la barra de herramientas, aparecerá una ventana de presentación, en la cual el usuario puede seleccionar iniciar, salir de la aplicación o ayuda. (Ilustración 20).

Ilustración 20. Pantalla de entrada ExtruAnálisis.



6.2.1 Datos de entrada del tornillo

Al presionar la flecha azul ubicada en la parte superior, aparecerá un nuevo cuadro llamado datos de entrada del tornillo (ilustración 21). Allí el usuario encontrará un formulario en donde debe entrar las características principales del

tornillo a evaluar. Con la tecla tabulador es posible navegar en el siguiente orden que es el recomendado para el ingreso de los datos:

- Diámetro del tornillo: diámetro exterior del tornillo en mm.
- Valores a ingresar: es posible ingresar los datos en mm. o en relación L/D.
- Paso: el paso puede ser constante o variable de acuerdo a la necesidad por defecto se encuentra la opción de Paso = 1D.
- Longitud del tornillo: longitud total del tornillo
- Longitud zona de alimentación: longitud de la zona de alimentación.
- Longitud zona de dosificación: longitud de la zona de dosificación.
- Profundidad del canal en la zona de alimentación: Valor de H_1 .
- Profundidad del canal en la zona de dosificación: Valor de H_2 (en su lugar también existe la posibilidad de ingresar la RC geométrica.)

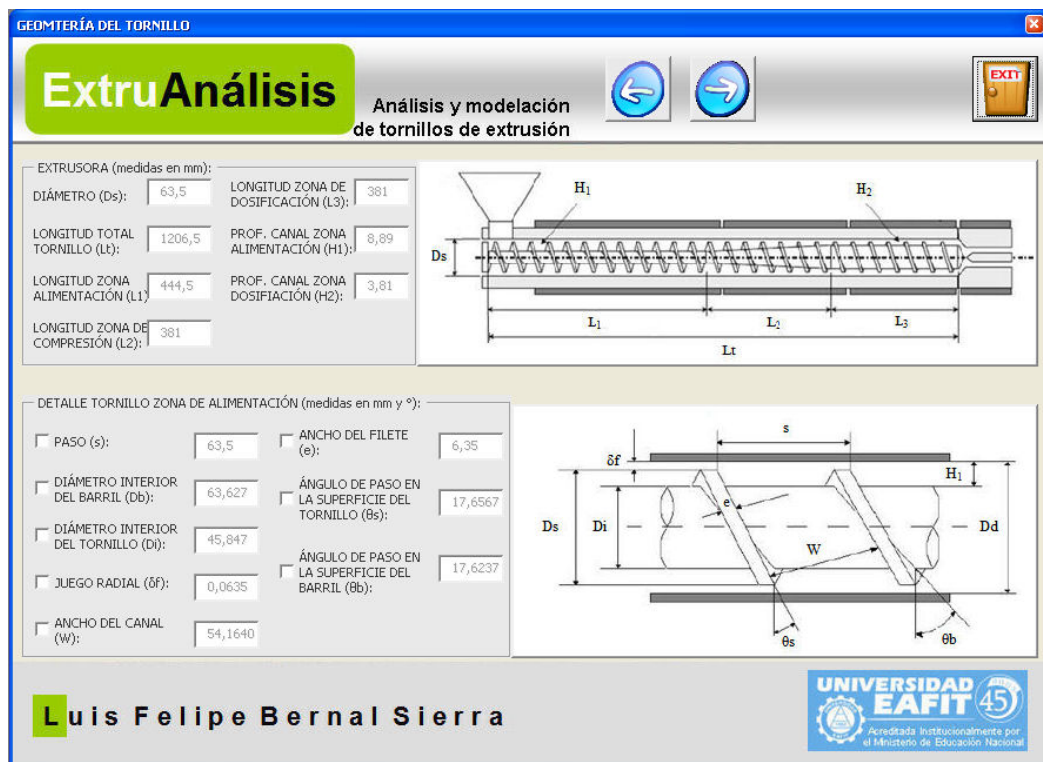
Ilustración 21. Pantalla datos de entrada tornillo.

En la parte inferior se muestra un cuadro de texto con información general de los datos que deben ingresarse. Una vez más el usuario puede continuar o salir del programa en cualquier momento.

6.2.2 Geometría del tornillo.

En la siguiente pantalla (ilustración 22), se presentan al usuario una serie de precálculos relacionados con la geometría del tornillo.

Ilustración 22. Pantalla geometría del tornillo.



En la parte superior se muestran datos relacionados con la geometría de la extrusora (Diámetro del tornillo, longitud total, longitud de la zona de alimentación, longitud de la zona de compresión, longitud de la zona de dosificación, profundidad del canal en la zona de alimentación y en la zona de dosificación. Debido a que estos datos provienen de los ingresados en la pantalla anterior no es

posible modificarlos en este formulario. Para hacerlo se debe retornar al inicio del programa.

En el sector inferior se encuentra un detalle del tornillo en la zona de alimentación que incluye el paso, diámetro interior del cilindro, juego radial, ancho del canal, ancho del filete y el ángulo de paso en la superficie del tornillo y del cilindro. A diferencia de los datos ubicados en la parte superior, si el usuario no está de acuerdo con alguno de ellos puede activar la casilla que antecede al valor y modificarlo a su gusto.

6.2.3. Condiciones del proceso

Las condiciones del proceso (Ilustración 23) requieren del ingreso de dos clases de datos, unos referentes a la extrusora y otros relacionados con el polímero a utilizar.

Ilustración 23. Pantalla condiciones del proceso.

CONDICIONES DEL PROCESO

ExtruAnálisis Análisis y modelación de tornillos de extrusión

EXIT

EXTRUSORA

DÍAMETRO DE LA TOLVA (mm) 200

ALTURA DE LA DESCARGA DE MATERIAL EN LA TOLVA (mm) 300

TEMPERATURA AMBIENTE (°C) 30

TEMPERATURA DEL TORNILLO (°C) 150

VELOCIDAD DEL TORNILLO (RPM) 100

NÚMERO DE CALEFACTORES

1 2 3 4 5

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL BARRIL (W/m)

4140
4340
BIMÉTALICO

TEMP. (°C)

1 185
2 180
3 185

POLÍMERO

LLDPE ENSAYO

CREAR

ELIMINAR

PROPIEDADES:

COEFICIENTES DE FRICCIÓN:

POLÍMERO - BARRIL 0,3

POLÍMERO - TORNILLO 0,2

FASE FUNDIDA:

DENSIDAD (kg/m³) 750

COND. TÉRMICA (W/m°C) 0,24

DENSIDAD PELLETS (kg/m³) 700

CAPACIDAD CALORÍFICA (J/kg °C) 2300

CALOR DE FUSIÓN (J/kg) 230000

TEMP FUSIÓN (°C) 128

Luis Felipe Bernal Sierra

UNIVERSIDAD EAFIT 45 años

Acreditada Institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional

Los datos de la extrusora incluyen el diámetro de la tolva, la altura de descarga de material (ambos necesarios para el cálculo de la presión inicial), la temperatura ambiente del lugar de operación, la temperatura del tornillo, el número de calefactores alrededor del cilindro y la temperatura de los mismos, la velocidad del tornillo y la el material del cual está hecho el cilindro.

Para el ingreso de los datos del material es necesario crear un nuevo material en la biblioteca del programa (ilustración 24), se advierte que las propiedades de este deben ser conocidas previamente ya que los resultados son muy sensibles al tipo de material a extruir. Cabe resaltar que en la pantalla de condiciones del proceso no es posible alterar las propiedades del material seleccionado. Para ello, como se mencionó anteriormente, debe crearse uno nuevo.

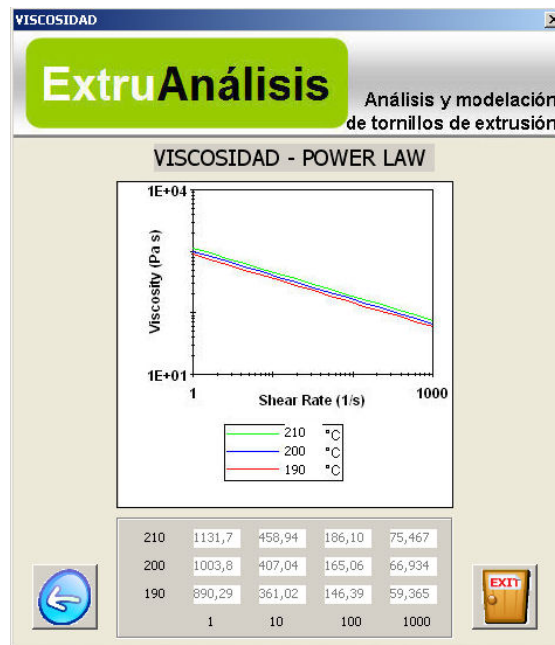
Ilustración 24. Pantalla condiciones del proceso.

\eta = m_0 \cdot e^{-b(T-T_0)} \dot{\gamma}^{n-1} and a 'CALCULAR' button. Below the equation are four input fields: 'Temperatura de referencia T_0' with value 200, 'Consistencia en T_0 m_0' with value 1003,8, 'Sensibilidad a temperatura b' with value 0,012, and 'Índice de Power Law n' with value 0,608. At the bottom of the window is a green checkmark icon."/>

Los datos de entrada del material comprenden el nombre, los coeficientes de fricción polímero-cilindro y polímero-tornillo, la densidad del material en fase

fundida, la conductividad térmica, la densidad de los pellets, la capacidad calorífica, la temperatura de fusión y el calor de fusión (Heat of fusion). El ingreso de la viscosidad del polímero obedece a la Ley de Power-Law por lo cual es necesario conocer el factor de sensibilidad a la temperatura b , el índice de Power-Law n y la consistencia en una temperatura de referencia T_0 . En la ilustración 25 se muestra la viscosidad calculada para 3 temperaturas y varias ratas de cizalladura.

Ilustración 25. Pantalla condiciones del proceso.

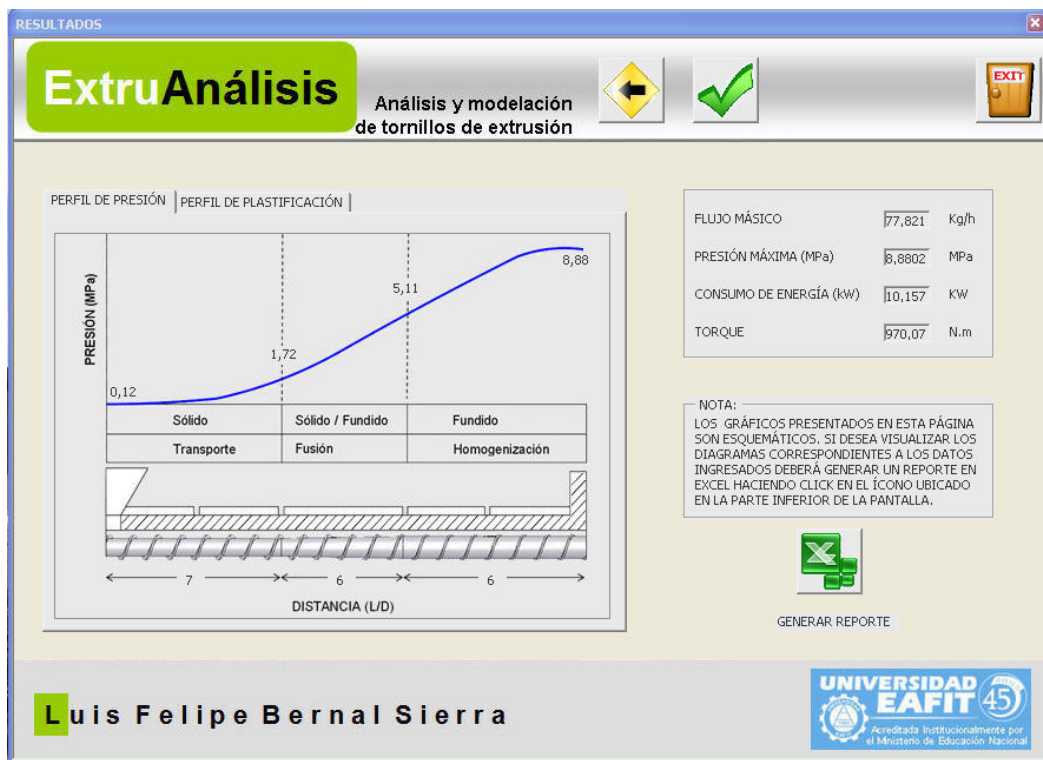


6.2.4. Resultados

La pantalla de resultados (ilustración 26) muestra los cálculos obtenidos a partir de los datos ingresados en los formularios anteriores.

Se muestra gráficamente el comportamiento de la presión y perfil del lecho sólido a lo largo del tornillo. Igualmente se obtienen los valores de relación de compresión volumétrica, consumo de potencia, así como también los valores máximos de caudal y presión.

Ilustración 26. Pantalla resultados.



Dado que VBA no ofrece la posibilidad de realizar gráficos a partir de una matriz de valores, se optó por utilizar gráficos esquemáticos para ilustrar el comportamiento del tornillo. Como alternativa de solución y para obtener el gráfico correspondiente al tornillo analizado, el usuario tiene la opción de generar un reporte en Microsoft Excel, el cual incluirá los datos y gráficos presentados en esta pantalla.

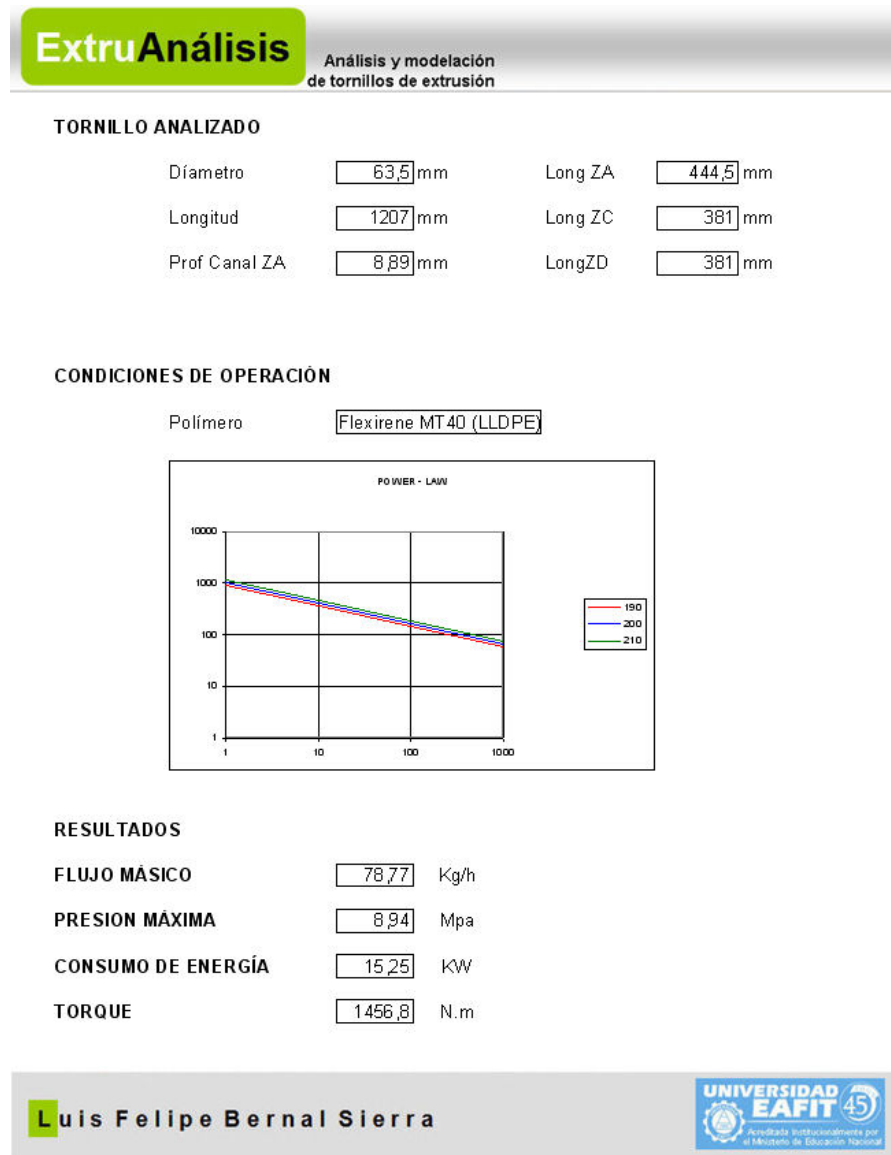
Si los valores obtenidos satisfacen las expectativas del usuario este los debe validarlos haciendo clic en la marca de verificación verde para continuar con el modelado del tornillo, de lo contrario puede retornar a la pantalla de datos de entrada del tornillo (toma de datos inicial).

6.2.5. Reporte

El reporte generado en Excel (ilustración 27), tarda alrededor de 30 segundos en ser generado. Lo anterior se debe a que las plataformas de SolidWorks y Microsoft

Excel necesitan, para la transmisión de datos, estar activas. Este compás de espera puede ser rebajado sustancialmente si la aplicación es llevada a una programación más avanzada y robusta como es el caso de C++.

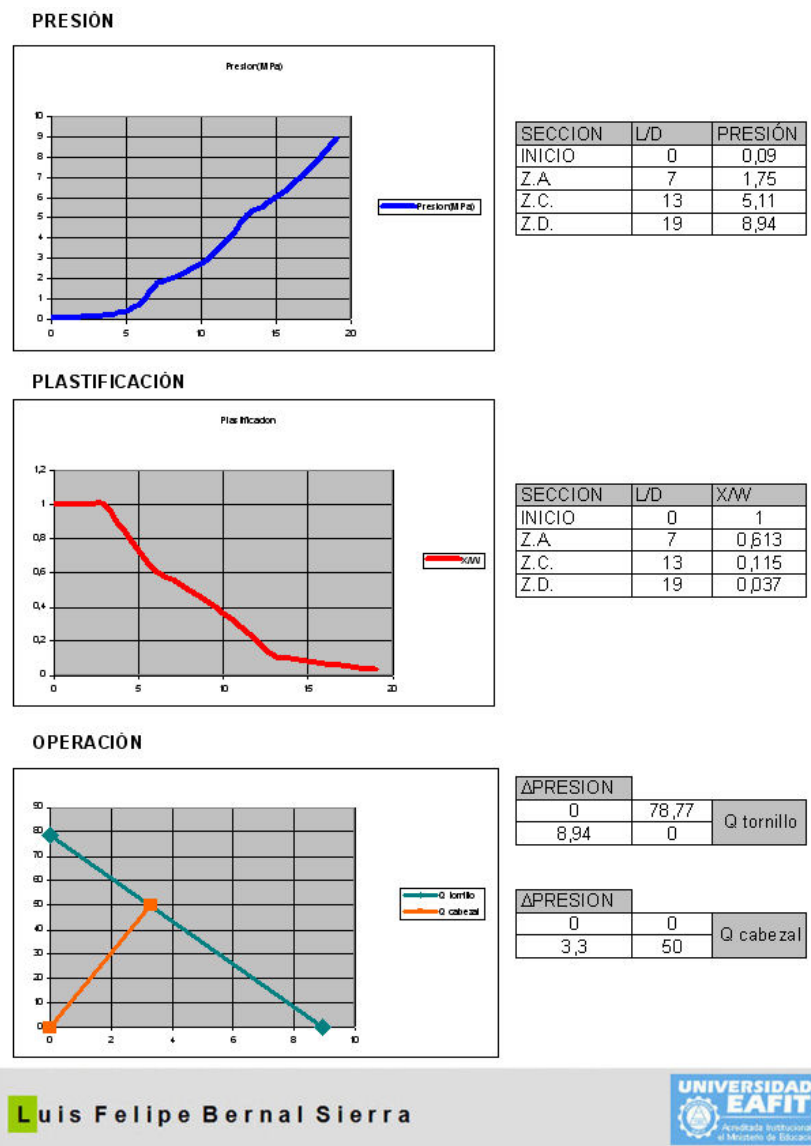
Ilustración 27. Hoja 1 reporte del análisis en Excel.



El reporte incluye las principales dimensiones del tornillo, el plástico a utilizar con el ploteo de su rata de cizalladura, el flujo másico, la presión máxima, el consumo

de energía y el torque en la primera hoja (ilustración 27). Para la segunda hoja (ilustración 28) se incluyen las graficas de presión, plastificación y la curva de operación del extrusor, dejando abierta la posibilidad al usuario de ingresar la presión y el caudal en el cabezal y encontrar el punto óptimo de operación de la extrusora.

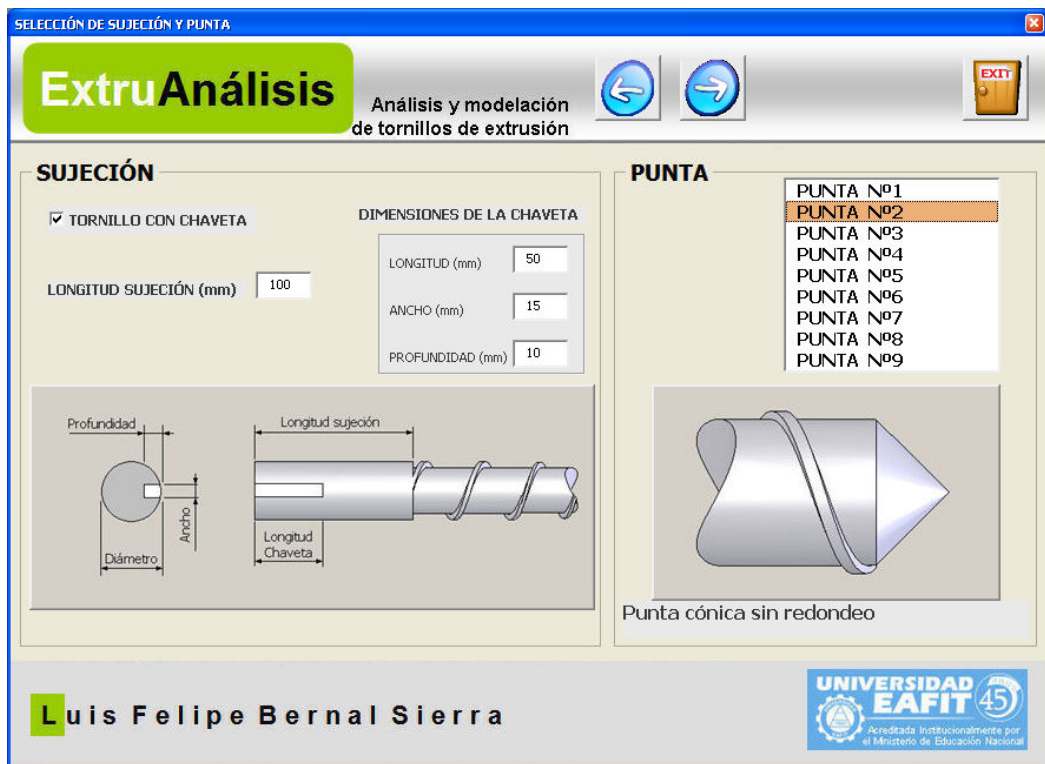
Ilustración 28. Hoja 2 reporte del análisis en Excel.



6.2.6. Sujeción y punta

La pantalla de selección de sujeción y punta (ilustración 29), hace parte ya del modelado paramétrico del tornillo. En esta se piden los datos de longitud de sujeción del tornillo que puede ser o no con chaveta, en caso de que esta exista se requieren las dimensiones de largo, ancho y profundidad del chivetero. Finalmente se selecciona de una lista de nueve posibles, el tipo de punta en que acaba el tornillo.

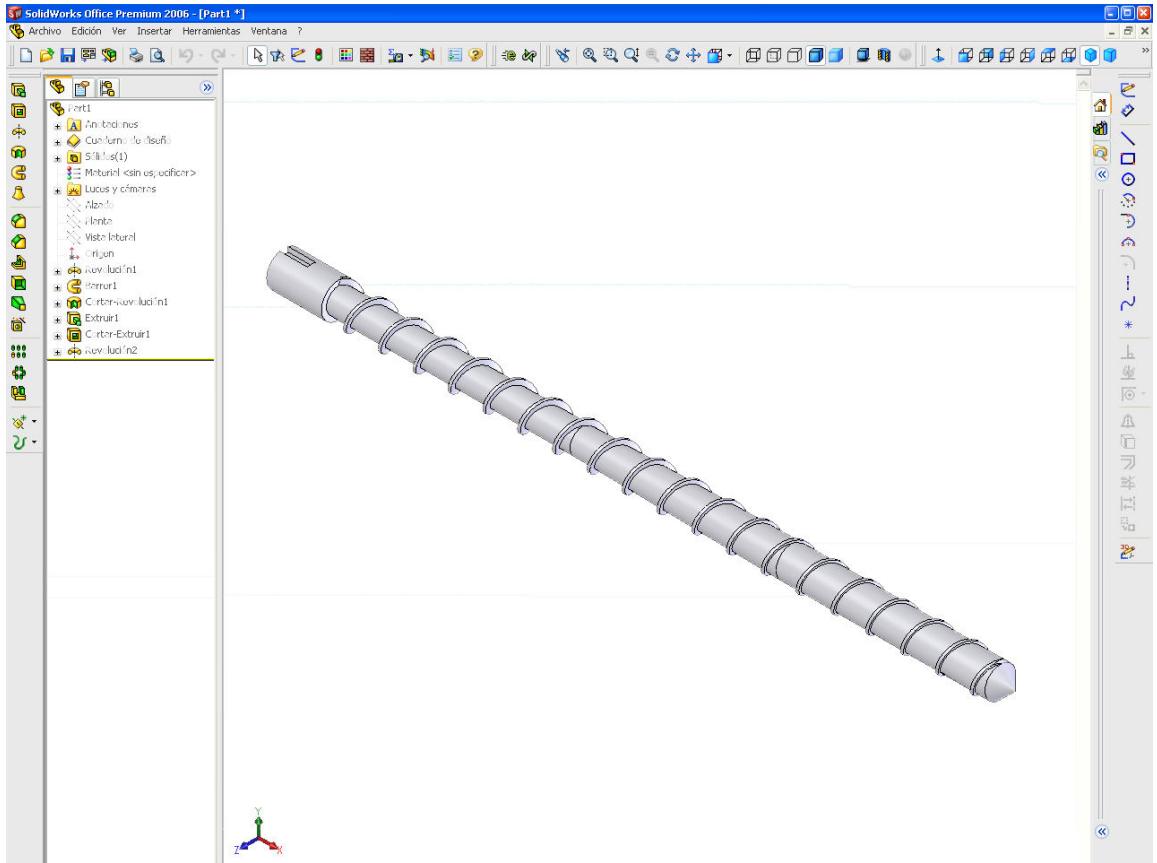
Ilustración 29. Pantalla selección de sujeción y punta.



6.2.6. Modelado del tornillo

Finalmente luego del usuario haber ingresado y validado la totalidad de los datos, y haciendo uso de variaciones al modulo implementado el semestre anterior en el proyecto de grado “Modelación paramétrica y manufactura de tornillos de extrusión de termoplásticos utilizando sistemas CAD/CAM/CAE”. Se efectúa la modelación del tonillo analizado en este proyecto de grado (ilustración 30).

Ilustración 30. Pantalla tornillo modelado.



7. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos con el desarrollo de este proyecto son registrados en el software implementado para trabajar bajo SolidWorks apoyado en los modelos teóricos expuestos en este escrito.

Como constancia se deja lo siguiente:

- Macro para SolidWorks programada en VBA encargada de realizar el análisis y la modelación de tornillos de extrusión para termoplásticos.
- Sustentación teórica de los modelos utilizados
- Artículo del proyecto de grado para el Cuaderno de investigación de Ingeniería Mecánica.

Lo anterior queda a la disposición del profesor Carlos Arturo Rodríguez y la biblioteca de la Universidad EAFIT

Este material servirá de apoyo a los estudiantes que cursen asignaturas relacionadas con el énfasis de plásticos, al proyecto de construcción de un laboratorio de plásticos y el público en general que desee conocer más a fondo el desempeño de una extrusora de termoplásticos.

8. LIMITACIONES DE LA APLICACIÓN EXTRUANÁLISIS.

Inicialmente Extruanálisis presenta la limitante de no poder ejecutarse independientemente de SolidWorks ya que el módulo de modelado necesita de este programa para mostrar el tornillo resultante del módulo de análisis.

Debido a los modelos matemáticos escogidos, sólo se podrán evaluar dos clases de tornillos estándar (de paso constante, variable) dejando la opción de en un futuro incluir el análisis de tornillos con desgasificación, sin zonas, entre otros.

La base de datos de polímeros es el punto en donde la aplicación requiere de más trabajo, esto incluye la caracterización reológica de los polímeros y la posibilidad de actualizar las propiedades de los mismos a medida que circulan por las diferentes zonas del tornillo, es decir variables como la densidad que a su vez depende de otras como la temperatura y la presión.

Otra limitante corresponde al no ingreso de datos relacionados con los elementos consecutivos a la zona de dosificación del tornillo entre los que se incluyen mezcladores, rompedores y cabezales.

Finalmente se debe incluir la grafica de temperatura del polímero a lo largo del tornillo, como parte de este proyecto se extrajeron algunas ecuaciones pero dada su complejidad no se llevó a cabo su implementación. Se plantea como una posible continuación de este proyecto de grado la ejecución de todos los complementos aquí descritos.

9. CONCLUSIONES.

La aplicación ExtruAnálisis está basada en los software utilizados para simular el comportamiento de los tornillos de extrusión, que requieren del ingreso de una serie de variables interrelacionadas referentes a: propiedades del material a extruir, geometría del tornillo y condiciones de operación, a partir de las cuales son capaces de predecir la cantidad de energía consumida, la productividad en términos de flujo másico por unidad de tiempo, el incremento de la presión a lo largo del tornillo y el espesor de lecho fundido entre otras, para que finalmente el usuario determine la configuración de máquina que le brinde una mayor eficiencia dentro de su proceso.

Los modelos utilizados para el desarrollo del proyecto están basados en las ecuaciones planteadas por reconocidos autores en la materia como lo son Zehev Tadmor, Chris Rauwendaal y Chan Chung, así como también las recopiladas por Antonio Lopes Da Cunha en su tesis doctoral de modelado y optimización de tornillos de extrusión.

La aplicación desarrollada requirió de una herramienta de fácil manejo y programación en la cual se pudiera efectuar una gran cantidad de cálculos siguiendo los modelos matemáticos encontrados en la bibliografía y dentro de la cual fuera posible hacer un vínculo con otros proyectos de modelación bajo SolidWorks realizados anteriormente en la Universidad EAFIT. Es gracias a esto que se optó por Visual Basic como plataforma de programación del proyecto.

El proyecto condujo a una aplicación capaz de predecir la capacidad de producción del tonillo, la presión máxima alcanzada durante la operación, la energía que consumida durante el proceso y el torque generado durante el mismo,

así como también la posibilidad de visualizar gráficamente el comportamiento de la presión y el ancho del lecho sólido a lo largo del tornillo. Las limitaciones de la misma son descritas en el capítulo 8 del presente proyecto.

El desarrollo de un software es un proceso de mejoramiento continuo, en el que siempre habrá algo a optimizar. La aplicación desarrollada en este proyecto se encuentra aún en este proceso, y para su evaluación, se presenta una versión Beta sujeta a pruebas y recomendaciones.

En nuestro medio es común observar empresas producir artículos extruídos en tornillos que no son los indicados para el polímero que están utilizando, ocasionando problemas de productividad y calidad. Lo anterior obedece a que no se tiene conciencia de la importancia que representa un adecuado diseño del tornillo y de su apropiado desempeño, bien sea por el empirismo que rige su manufactura en el medio local o por los altos costos de herramientas computacionales que simulen el comportamiento del tornillo antes de su fabricación. Con este proyecto pretende incentivar a las industrias colombianas a tener altos niveles de competitividad mediante el cambio cultural que implica el uso de nuevas tecnologías.

10. PROPUESTAS PARA FUTUROS PROYECTOS

Incorporar en un programa todas las herramientas generadas a partir de proyectos de grado como este que tengan relación con el análisis y modelación de los componentes involucrados en el proceso de extrusión, incluyendo el análisis, la modelación, la generación de planos y de ser posible el mecanizado CNC de estos elementos.

Realizar una investigación con el objeto de incorporar en la herramienta una completa base de datos de materiales actuales mediante la implementación de un programa que corrija las propiedades para las diferentes condiciones de proceso.

Adicionar un módulo que permita estimar los costos de los tornillos modelados y de esta manera tomar la mejor decisión

Continuar fomentando los proyectos que impliquen el uso de herramientas de programación y computación CAD/CAM/CAE para facilitar el diseño, modelación, manufactura y análisis, ya que esta es una tecnología de vanguardia en el ámbito industrial en la cual las universidades del país no se pueden quedar atrás.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS TOMADAS DE LIBROS

CHUNG, Chan I. Extrusion of polymers: theory and practice. Cincinnati, E.E.U.U. : Hanser, 2000. 340 p. ISBN 1-56990-288-7

HERNANDEZ, Jaime; VARGAS, Gilberto y HERNANDEZ, Juan Diego. Fundamentos de la programación. Pereira : CEKIT, 1999. 320 p. ISBN 958-65-7176-9

LOPES DA CUNHA, Antonio Gaspar. Modelling and optimisation of single screw extrusion. Minho, Portugal. 1999, 189p. Tesis doctoral. Universidad do Minho. Ingeniería de Polímeros.

MORTON – JONES, D. H. Procesamiento de plásticos. Ciudad de México, México : Limusa, 1993. 302 p. ISBN 968-18-4434-3

NARANJO C. Alberto *et al.* Extrusion processing data. Cincinnati, E.E.U.U. : Hanser, 2001. 128 p. (Plastics Pocket Power Series). ISBN 1-56990-331

NORIEGA, Maria del Pilar *et al.* Curso de introducción a la extrusión de termoplásticos. Medellín, Colombia : ICIPC, 1996. 120 p.

RAUWENDAAL, Chris. Polymer extrusion. 3 *ed.* Cincinnati, E.E.U.U. : Hanser, 1994. 568 p. ISBN 1-56990-140-6

TADMOR, Zehev y KLEIN, Imrich. Engineering principles of plasticating extrusion. New York, E.E.U.U. : Van Nostrand Reinhold, 1970. 500p.

TADMOR, Zehev y COSTAS, Gogos. Principles of polymer processing. New York, E.E.U.U. : John Wiley, 1979. 752p. ISBN 0-471-84320-2

The NEXTRUCAD program manual [CD-ROM]: Ontario, Canadá : Polydynamics, Inc. 2004.

REREFERENCIAS TOMADAS DE INTERNET

Compuplast @ 2005

Compuplast [En línea]. FLOW 2000 Compuplast extrusion simulation software. [Citado el 5 de abril de 2005]. Disponible en internet: <http://www.compuplast.com>

Dualspiralsystems @ 2005

Dual Spiral Systems [En línea]. Extrusim 2000 Downloads. [Citado el 5 de abril de 2005]. Disponible en internet: <http://www.dualspiralsystems.com>

Polydynamics @ 2005

Polydynamics [En línea]. NEXTRUCAD powerful computer simulation for polymer extrusion. [Citado el 5 de abril de 2005]. Disponible en internet: <http://www.polydynamics.com/nextrucad.htm>

Serrano @ 2005

Serrano, Carlos. [En línea]. Plástico. Extrusión - Herramientas para predecir problemas en extrusión. [Citado el 13 de abril de 2005]. Disponible en internet: http://www.plastico.com/pragma/documenta/plastico/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARTICULOS/doc_31680_prnIN04.html?idDocumento=31680

Sparproducts @ 2005

Scientific Process and Research [En línea]. Extrud 2000 Software. [Citado el 5 de abril de 2005]. Disponible en internet: <http://www.sparproducts.com/>