

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

**Presentado por:
Luis Felipe Bernal Sierra**

CONTENIDO

Objetivos

Desarrollo proyecto

Software ExtruAnálisis

Conclusiones

Preguntas

OBJETIVO 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.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar los tipos de software para el análisis de tornillos existentes y establecer el punto de referencia a donde apunta el proyecto.
- Establecer los modelos unidimensionales simplificados a utilizar.
- Seleccionar un lenguaje de programación adecuado para facilitar el montaje de una plataforma dinámica y amigable para los usuarios.
- 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.
- Elaborar un tutorial con las especificaciones y detalles del software en donde se muestre la forma de interacción entre este y el usuario, mediante el desarrollo de un ejemplo práctico.
- Concluir con un análisis sobre las limitaciones de la herramienta, entre ellas los tipos de tornillos y materiales que se pueden utilizar.

DESARROLLO DEL PROYECTO

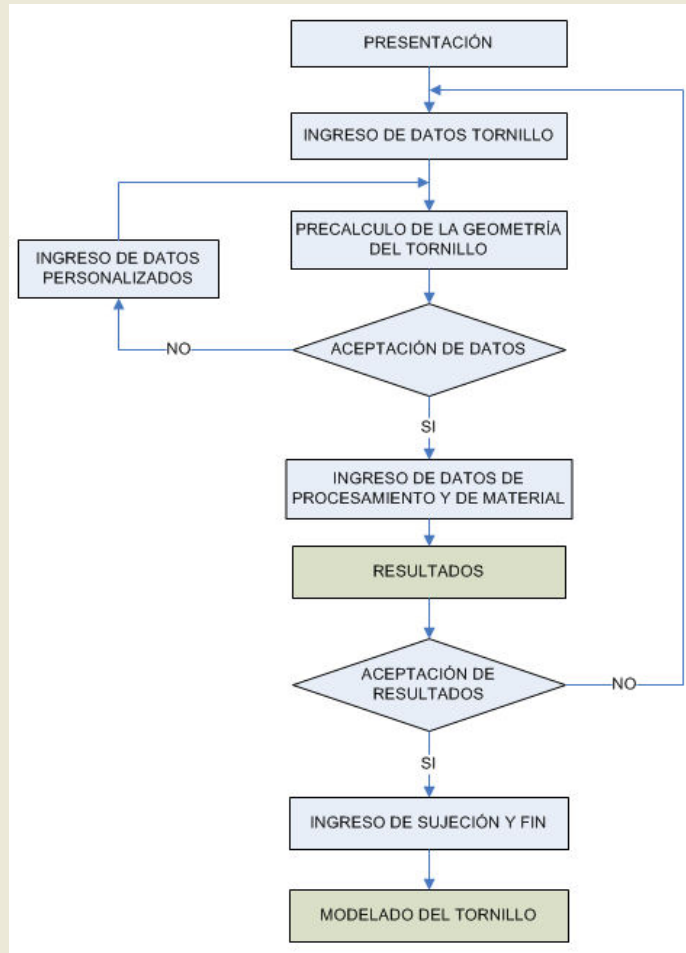
ExtruAnálisis permite simular las condiciones de operación del tornillo, para lo cual el usuario deberá ingresar algunos datos como lo son las características del polímero utilizado, la geometría del tornillo y las condiciones del proceso.

Para la generación de los resultados se solucionan modelos matemáticos en cada una de las zonas del tornillo. La aproximación numérica a la solución de los modelos se realiza dividiendo el tornillo 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.

DESARROLLO DEL PROYECTO



----- Algoritmo para cada zona -----

Datos de entrada:

- Geometría
- Material
 - Viscosidad
- Condiciones de operación

Calcule la presión P

Calcule perfil de plastificación X/W

Mientras:

Z no sea igual a la longitud de la zona

Hallar:

Caudal Q

Presión P

Perfil de plastificación X/W

Consumo de energía e_w

DESARROLLO DEL PROYECTO

- Modelos matemáticos

Caudal:

$$Q = \pi^2 N H D_b (D_b - H) \frac{\tan \phi \tan \theta_b}{\tan \phi + \tan \theta_b} \left[1 - \frac{pe}{\pi (D_b - H) \overline{\text{sen} \theta}} \right] \quad (\text{Lopes da Cunha, 1999,66})$$

Presión:

$$P_1 = \frac{R_h \rho g}{2 f K'} [1 - \exp(-2 f Y K' / R_h)] \quad (\text{Tadmor, 1970, 67})$$

$$P_2 = P_1 \exp \left[\int_{z_1}^{z_2} \left(\frac{B_1 - A_1 K}{B_2 + A_2 K} \right) dz \right] \quad (\text{Lopes da Cunha, 1999,67})$$

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

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

$$B_1 = f_b W_b \cos \phi - 2 H f_s \text{sen} \theta_b \cot g \bar{\theta} \frac{\bar{D}}{D_b} - W_s f_s \text{sen} \theta_b \cot g \theta_s \frac{D_s}{D_b} \quad (\text{Tadmor, 1970, 61})$$

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

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

DESARROLLO DEL PROYECTO

- Modelos matemáticos

Plastificación:

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

(Tadmor, 1970, 118)

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

Energía:

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

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

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

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

(Lopes da Cunha, 1999,68)

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

EXTRUANÁLISIS

ExtruAnálisis

ExtruAnálisis Análisis y modelación de tornillos de extrusión



Asesor: Carlos A. Rodriguez

Luis Felipe Bernal Sierra



Luis Felipe Bernal Sierra



EXTRUANÁLISIS

DATOS DE ENTRADA TORNILLO

ExtruAnálisis

Análisis y modelación de tornillos de extrusión

DIAMETRO DEL TORNILLO (mm) 63,5

VALORES EN:
 DIÁMETROS MILÍMETROS

PASO:
PASO: CONSTANTE 1
PASO INICIAL
PASO FINAL

LONGITUDES:
LONGITUD DEL TORNILLO: 19
LONGITUD ZONA DE ALIMENTACIÓN: 7
LONGITUD ZONA DE DOSIFICACIÓN: 6

H - RELACIÓN DE COMPRESIÓN:
PROFUNDIDAD DEL CANAL EN LA ZONA DE ALIMENTACIÓN: 0,14
 RELACIÓN DE COMPRESIÓN (CR)
 PROFUNDIDAD DEL CANAL EN LA ZONA DE DOSIFICACIÓN: 0,06

El diagrama muestra un tornillo de extrusión con las siguientes características:

- Longitud total: Indicada por una línea superior que abarca toda la longitud del tornillo.
- Profundidad Canal: Indicada por una línea que muestra la profundidad del canal en la zona de alimentación.
- Paso: Indicado por una línea que muestra la distancia entre dos crestas de la hélice.
- Diámetro: Indicado por una línea que muestra el diámetro nominal del tornillo.
- Zona Alimentación: La zona inicial del tornillo.
- Zona Compresión: La zona intermedia del tornillo.
- Zona Dosificación: La zona final del tornillo.

INFORMACION GENERAL
Este tornillo está compuesto por tres zonas y paso constante o variable. Los demás valores deben estar dentro de las siguientes especificaciones:
Longitud total: 20D - 30D
Longitud de la Zona de Alimentación: 4D - 8D
Longitud de la Zona de Dosificación: 6D - 10D
Paso: 1D (ángulo de hélice = 17.66)
Profundidad del canal en la Zona de Alimentación: 0,1D - 0,15D

Luis Felipe Bernal Sierra

UNIVERSIDAD EAFIT 45
Acreditada Institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional

Luis Felipe Bernal Sierra



EXTRUANÁLISIS

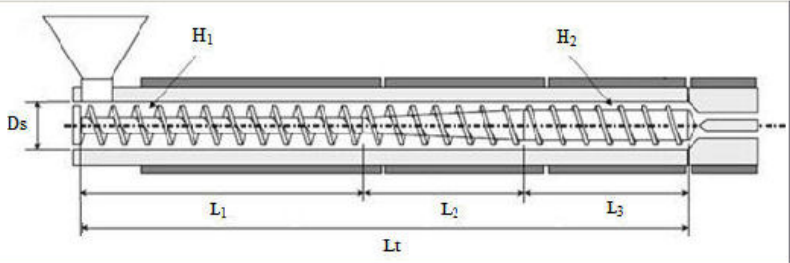
GEOMETRÍA DEL TORNILLO

ExtruAnálisis

Análisis y modelación de tornillos de extrusión

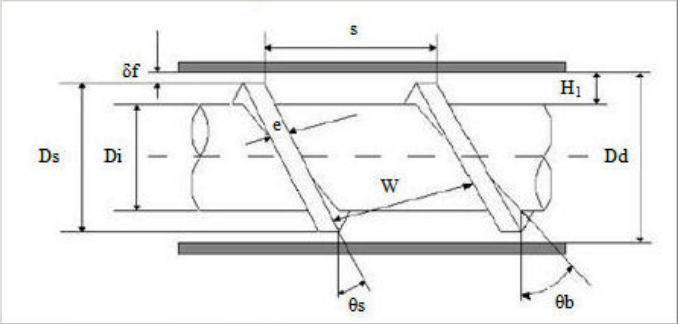
EXTRUSORA (medidas en mm):

DIÁMETRO (D_s):	63,5	LONGITUD ZONA DE DOSIFICACIÓN (L_3):	381
LONGITUD TOTAL TORNILLO (L_t):	1206,5	PROF. CANAL ZONA ALIMENTACIÓN (H_1):	8,89
LONGITUD ZONA ALIMENTACIÓN (L_1):	444,5	PROF. CANAL ZONA DOSIFICACIÓN (H_2):	3,81
LONGITUD ZONA DE COMPRESIÓN (L_2):	381		



DETALLE TORNILLO ZONA DE ALIMENTACIÓN (medidas en mm y °):

<input type="checkbox"/> PASO (s):	63,5	<input type="checkbox"/> ANCHO DEL FILETE (e):	6,35
<input type="checkbox"/> DIÁMETRO INTERIOR DEL BARRIL (D_b):	63,627	<input type="checkbox"/> ÁNGULO DE PASO EN LA SUPERFICIE DEL TORNILLO (θ_s):	17,6567
<input type="checkbox"/> DIÁMETRO INTERIOR DEL TORNILLO (D_i):	45,847	<input type="checkbox"/> ÁNGULO DE PASO EN LA SUPERFICIE DEL BARRIL (θ_b):	17,6237
<input type="checkbox"/> JUEGO RADIAL (δf):	0,0635		
<input type="checkbox"/> ANCHO DEL CANAL (w):	54,1640		



Luis Felipe Bernal Sierra

UNIVERSIDAD EAFIT 45
Acreditada Institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional

Luis Felipe Bernal Sierra



EXTRUANÁLISIS

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
Acreditada Institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional

Luis Felipe Bernal Sierra



EXTRUANÁLISIS

NUEVO MATERIAL

ExtruAnálisis

Análisis y modelación de tornillos de extrusión

NOMBRE NUEVO MATERIAL
Flexirene MT40 (LLDPE)

PROPIEDADES:

COEFICIENTES DE FRICCIÓN:

POLÍMERO - BARRIL: 0,4
POLÍMERO - TORNILLO: 0,25

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

VISCOSIDAD POWER-LAW:

Ecuación: $\eta = m_0 \cdot e^{-b(T-T_0)} \dot{\gamma}^{n-1}$ **CALCULAR**

Temperatura de referencia T_0 : 200
Consistencia en T_0 m_0 : 1003,8

Sensibilidad a temperatura b : 0,012
Indice de Power Law n : 0,608

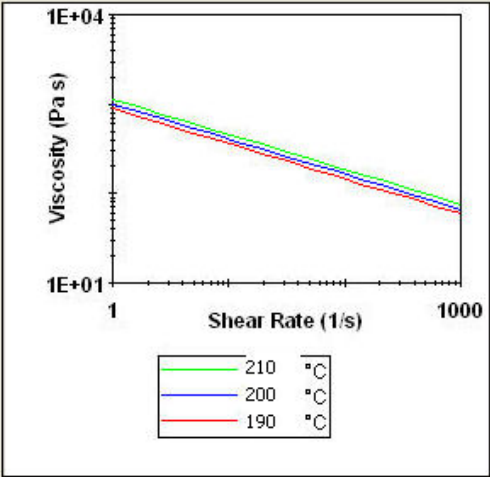


VISCOSIDAD



ExtruAnálisis

Análisis y modelación de tornillos de extrusión

VISCOSIDAD - POWER LAW



210	1131,7	458,94	186,10	75,467
200	1003,8	407,04	165,06	66,934
190	890,29	361,02	146,39	59,365
	1	10	100	1000

EXTRUANÁLISIS

RESULTADOS

ExtruAnálisis

Análisis y modelación de tornillos de extrusión

PERFIL DE PRESIÓN | PERFIL DE PLASTIFICACIÓN

ESPEJOR LECHO SÓLIDO	0,61	0,11	0,036
Sólido	Sólido / Fundido	Fundido	
Transporte	Fusión	Homogenización	

DISTANCIA (L/D)

7 6 6

FLUJO MÁSSICO	78,767	Kg/h
PRESIÓN MÁXIMA (MPa)	8,9441	MPa
CONSUMO DE ENERGÍA (kW)	15,254	KW
TORQUE	1456,8	N.m

NOTA:
LOS GRÁFICOS PRESENTADOS EN ESTA PÁGINA SON ESQUEMÁTICOS. SI DESEA VISUALIZAR LOS DIAGRAMAS CORRESPONDIENTES A LOS DATOS INGRESADOS DEBERÁ GENERAR UN REPORTE EN EXCEL HACIENDO CLICK EN EL ÍCONO UBICADO EN LA PARTE INFERIOR DE LA PANTALLA.

GENERAR REPORTE

Luis Felipe Bernal Sierra

UNIVERSIDAD EAFIT 45
Acreditada Institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional

Luis Felipe Bernal Sierra



EXTRUÁNÁLISIS

ExtruAnálisis

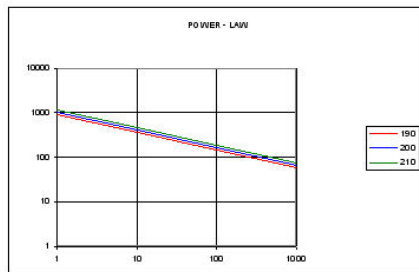
Análisis y modelación de tornillos de extrusión

TORNILLO ANALIZADO

Díametro mm Long ZA mm
 Longitud mm Long ZC mm
 Prof Canal ZA mm LongZD mm

CONDICIONES DE OPERACIÓN

Polímero



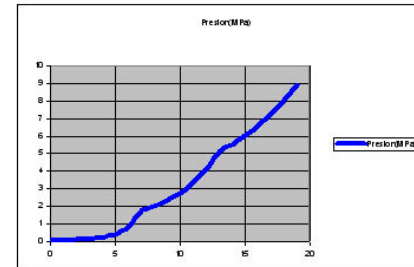
RESULTADOS

FLUJO MÁSSICO Kg/h
 PRESION MÁXIMA Mpa
 CONSUMO DE ENERGÍA KW
 TORQUE N.m

Luis Felipe Bernal Sierra

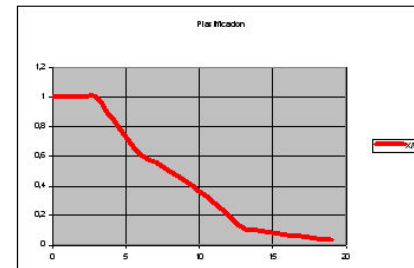


PRESIÓN



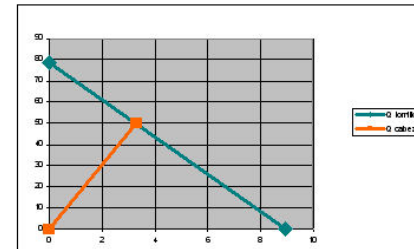
SECCION	L/D	PRESIÓN
INICIO	0	0,09
Z.A	7	1,75
Z.C	13	5,11
Z.D	19	8,94

PLASTIFICACIÓN



SECCION	L/D	X/W
INICIO	0	1
Z.A	7	0,613
Z.C	13	0,115
Z.D	19	0,037

OPERACIÓN



ΔPRESION	Q	Q tornillo
0	78,77	
8,94	0	

ΔPRESION	Q	Q cabeza
0	0	
3,3	50	

Luis Felipe Bernal Sierra



Luis Felipe Bernal Sierra



EXTRUANÁLISIS

SELECCIÓN DE SUJECIÓN Y PUNTA

ExtruAnálisis

Análisis y modelación de tornillos de extrusión

TORNILLO CON CHAVETA

LONGITUD SUJECIÓN (mm)

DIMENSIONES DE LA CHAVETA

LONGITUD (mm)

ANCHO (mm)

PROFUNDIDAD (mm)



PUNTA

- PUNTA Nº1
- PUNTA Nº2
- PUNTA Nº3
- PUNTA Nº4
- PUNTA Nº5
- PUNTA Nº6
- PUNTA Nº7
- PUNTA Nº8
- PUNTA Nº9



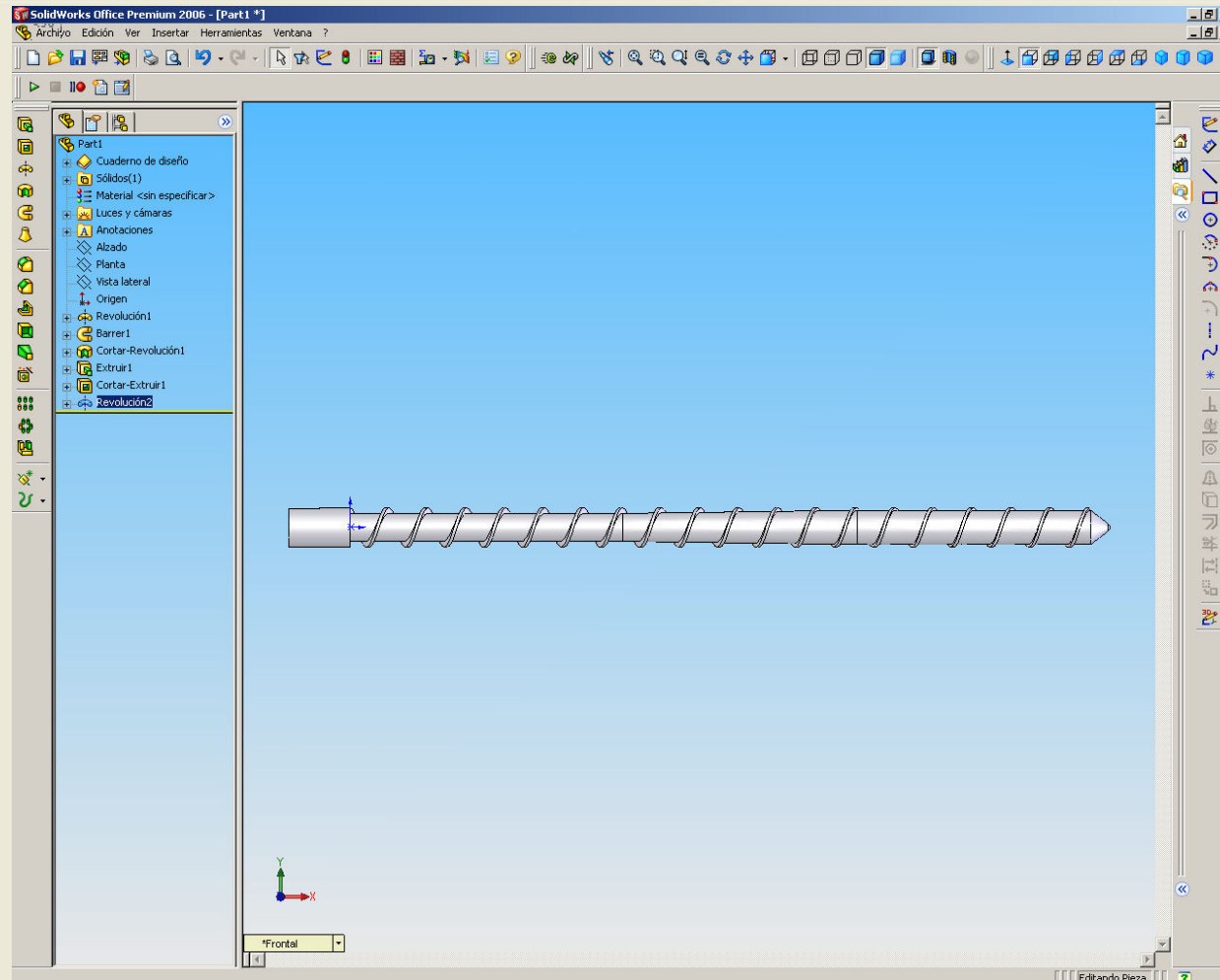
Punta cónica con redondeo en el extremo

Luis Felipe Bernal Sierra

UNIVERSIDAD EAFIT 45 años
Acreditada Institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional

Luis Felipe Bernal Sierra

EXTRUÁNÁLISIS



Luis Felipe Bernal Sierra



LIMITACIONES DE LA APLICACIÓN

- Ejecución Bajo SolidWorks
- Evaluación de dos tipos de tornillos únicamente.
- Base de datos de polímeros (caracterización reológica).
- Imposibilidad de actualizar las propiedades del polímero a lo largo del tornillo.
- Carencia de análisis sobre elementos restantes del proceso (mezcladores, rompedores, cabezales).
- Falta de control sobre las temperaturas.

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.

CONCLUSIONES

- 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 tornillo, 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.

RECOMENDACIONES

- Incorporar 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.
- 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.
- Fomentar 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.

¿PREGUNTAS?

Luis Felipe Bernal Sierra

