

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN, DE MOLDES PARA
EXTRUIR MEZCLAS DE PLÁSTICO DE DESECHO MAS FIBRAS,
PARA EXTRUSORA DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE
MATERIALES**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

**CARLOS LENIN BOHADA PALACIOS
PATRICIO JAVIER QUISANGA MARTÍNEZ**

**DIRECTOR: ING. JOSÉ PÉREZ
CODIRECTOR: ING. FERNANDO OLMEDO**

Sangolquí, 2011-09-01

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “SIMULACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN, DE MOLDES PARA EXTRUIR MEZCLAS DE PLÁSTICO DE DESECHO MAS FIBRAS, PARA EXTRUSORA DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES” fue realizado en su totalidad por Carlos Lenin Bohada Palacios y Patricio Javier Quisanga Martínez, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Pérez

DIRECTOR

Ing. Fernando Olmedo

CODIRECTOR

Sangolquí, 2011-09-01

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“SIMULACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN, DE MOLDES PARA EXTRUIR
MEZCLAS DE PLÁSTICO DE DESECHO MAS FIBRAS, PARA EXTRUSORA
DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES”**

ELABORADO POR:

Carlos Bohada

Patricio Quisanga

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Ing. Xavier Sánchez
EL DECANO**

Sangolquí, 2011-07-20

DEDICATORIA

La culminación de mi carrera se la dedico primeramente a mi padre por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento en los momentos que todo parecía complicado y en segundo lugar a mi madre por haberme enseñado que las cosas importantes se consiguen a base de esfuerzo y dedicación.

Carlos

Dedico este trabajo a mis padres, Rebeca y Vicente de los que día a día recibo un apoyo constante y a mis hermanos Vicente y Diego, quienes siempre supieron respaldarme y brindarme comprensión ante cualquier adversidad.

Patricio

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que de una u otra forma hicieron posible la culminación de mi carrera, ya que en momentos difíciles o que no entendía ciertas cosas ellos estuvieron ahí, entre esas personas esta mi novia (Liz), mis amigos del colegio, Chicho, Pasto, Cocho, Nelson y por ultimo mis panas de la universidad Santiago y Pato que siempre me brindaron su colaboración.

Carlos

Agradezco a todos aquellos que formaron parte en este ciclo que esta por concluir, a mis amigos de la universidad Santiago y William que supieron dar la ayuda necesaria, a los Ingenieros Pérez y Olmedo que siempre estuvieron dispuestos a dispersar cualquier interrogante, y a Carlos que en los momentos de dificultad más que un compañero supo ser un amigo, y al que gracias a su empeño y esfuerzo se logró sacar este proyecto adelante.

Patricio

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
TABLAS	xiv
FIGURAS	xvi
NOMENCLATURA	xix
ANEXOS	xxii
RESUMEN	xxv
INTRODUCCIÓN	xxvi

INDICE DE CONTENIDOS

1. CAPITULO I.- GENERALIDADES

1.1.	Antecedentes	1
1.2.	Planteamiento del problema	2
1.3.	Objetivos	2
1.3.1.	General	2
1.3.2.	Específicos	2
1.4.	Alcance	3
1.5.	Justificación e importancia	4

2. CAPITULO II.- MARCO TEÓRICO

2.1.	Reciclaje de plásticos	5
2.1.1.	Introducción	5
2.1.2.	Tipos de reciclaje	6
2.1.3.	Reciclaje mecánico	8
2.1.4.	Reciclaje químico	9
2.1.5.	Ventaja del reciclaje de plásticos	9
2.2.	Cambios físicos de los plásticos por efecto de la temperatura	10
2.2.1.	Termoplásticos	10
2.2.2.	Termoestables	18
2.2.3.	Polietileno líquido	20
2.3.	Proceso de extrusión	28
2.3.1.	Zonas en el proceso de extrusión	29
2.3.2.	La zona del dado	31
2.3.3.	Mecanismos del flujo	31
2.3.4.	Análisis de flujo	33
2.3.5.	Influencia de las propiedades del polímero	35
2.3.6.	El dado de extrusión	38

2.4.	Materiales compuestos a base de plásticos mas fibras	46
2.4.1.	Productos realizados a base de plástico y aserrín	47
2.4.2.	Productos realizados a base de plástico y fibra de vidrio	48
2.4.3.	Productos realizados a base de plástico mas fibras naturales	49
2.5.	Materiales para construcción de moldes para extruir plástico	50
2.5.1.	Impax supreme	50
2.5.2.	Ramax HH	51
2.5.3.	Stavax ESR	52
2.5.4.	Corrax	54
2.6.	Estudio de materiales utilizados en el medio para la construcción de moldes para extrusión de plásticos	56
2.6.1.	Acero BÖHLER M238	56
2.6.2.	Acero BÖHLER M201	59
2.6.3.	Acero BÖHLER V945 (AISI 1045)	61
2.7.	Proceso de extrusión en el molde	64
2.7.1.	Molde de extrusión	66
2.7.2.	Efectos de la entrada del molde	66
2.7.3.	Principales componentes de un cabezal de extrusión	67
2.7.4.	Calculo del ángulo para fluido cónico	69
2.7.5.	Inestabilidades en la salida del molde	71
2.7.6.	Hinchamiento en el molde	72
2.7.7.	Extrusión de perfiles	73
2.8.	Estado de esfuerzo en un punto del molde, teoría de falla	75
2.8.1.	Componentes del esfuerzo	75
2.8.2.	Teoría de falla	78
2.8.3.	Esfuerzo normal máximo	79
2.8.4.	Esfuerzo cortante máximo	79
2.8.5.	Energía de distorsión (Von Mises)	79
2.8.6.	Concentración de esfuerzos	80
2.8.7.	Esfuerzos en cilindros	81
2.9.	Fenómenos térmicos y de transferencia de calor	

	en el proceso de moldeo por extrusión	82
2.9.1.	Transferencia de calor por conducción	82
2.9.2.	Transferencia de calor por convección	84
2.9.3.	Deformación que causan los cambios de temperatura	85
2.9.4.	Expansión térmica	85
2.9.5.	Esfuerzo térmico	87
2.9.6.	Contracción y deformación	88
2.10.	Mecánica de fluidos aplicado a plásticos	95
2.10.1.	Reología	95
2.10.2.	Clasificación reológica	96
2.10.3.	Fluido Newtoniano	97
2.10.4.	Fluido No newtoniano	98
2.10.5.	Fluidos plásticos	98
2.10.6.	Fluidos Pseudoplásticos	100
2.10.7.	Fluidos Dilatantes	100
2.10.8.	Modelos reológicos para fluidos no newtonianos	101
2.11.	Operación del software SolidWorks y CosmosFloWorks	108
2.11.1.	Historia	108
2.11.2.	CosmosFloWorks	108
2.11.3.	CosmosWorks	109
2.11.4.	Metodología de análisis	110
2.11.5.	Suposición de linealidad	111
2.11.6.	Suposición de elasticidad	111
2.11.7.	Suposición estática	112
2.11.8.	Interpretación de los valores del factor de seguridad	112
2.11.9.	Análisis de esfuerzo	113
2.11.10.	Análisis de tensión térmica	114
2.11.11.	Opciones térmicas	115
2.11.12.	Opciones de presión de fluidos	116
2.11.13.	Para estudios no lineales	117

3. CAPITULO III.- SIMULACIONES

3.1.	Características de la extrusora del L.M.M	121
3.2.	Simulación de flujo plástico	125
3.2.1.	Teórico (Cálculo importado de Mathcad)	125
3.2.2.	Modelado del molde	131
3.2.3.	Análisis de flujo utilizando CosmosFloWorks	134
3.2.4.	Variables que influyen en el flujo másico del molde	143
3.3.	Simulación Termo mecánica	144
3.3.1.	Esfuerzo de Von Mises	148
3.3.2.	Deformaciones	149
3.3.3.	Deformaciones unitarias	151

4. CAPITULO IV.- DISEÑO MECANICO

4.1.	Material del molde	155
4.1.1.	Características que debe tener el material	155
4.1.2.	Rangos de temperatura en la deformación	157
4.2.	Molde perfil rectangular	159
4.2.1.	Distribución del factor de seguridad molde rectangular	159
4.2.2.	ISO superficies molde rectangular	160
4.3.	Molde perfil cuadrado	164
4.3.1.	Distribución del factor de seguridad molde cuadrado	164
4.3.2.	ISO superficies molde cuadrado	165

5. CAPITULO V.- CONSTRUCCIÓN DE MOLDES

5.1.	Torneado	170
5.2.	Proceso de electro erosión	173
5.3.	Fresado	177

6. CAPITULO VI.- PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

6.1.	Preparación de materia prima	179
6.2.	Mantenimiento del equipo	180
6.3.	Protocolo de pruebas	186
6.4.	Análisis de resultados	211

7. CAPITULO VII.- ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

7.1.	Costos directos	216
7.2.	Costos indirectos	218
7.3.	Financiamiento	219

8. CAPITULO VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1.	Conclusiones	220
8.2.	Recomendaciones	222

BIBLIOGRAFIA

PLANOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Parámetros de comparación entre PE-LD y PE-HD	12
Tabla 2.2: Propiedades del polietileno líquido	21
Tabla 2.3: Oxidación del Polietileno	25
Tabla 2.4: Coeficientes de fricción de varios polímeros	36
Tabla 2.5: K para cilindros y rectángulos	40
Tabla 2.6: Impax Supreme resistencia a la tensión	50
Tabla 2.7: Impax Supreme templado y revenido 310 HB	51
Tabla 2.8: Impax Supreme resistencia a la compresión	51
Tabla 2.9: Ramax HH templado y revenido 340 HB	52
Tabla 2.10: Ramax HH resistencia a la tensión	52
Tabla 2.11: Stavax ESR templado y revenido 340 HB	53
Tabla 2.12: Stavax ESR resistencia a la tensión	53
Tabla 2.13: Corrax envejecimiento a 46 HRC	55
Tabla 2.14: Corrax resistencia a la tensión a temperatura ambiente	55
Tabla 2.15: Corrax resistencia a la compresión a temperatura ambiente	55
Tabla 2.16: Composición Química acero BÖHLER M238	57
Tabla 2.17: Composición Química acero BÖHLER M201	59
Tabla 2.18: Composición Química acero AISI 1045	62
Tabla 2.19: Conductividad térmica para ciertos materiales	83
Tabla 2.20: Coeficientes de expansión térmica	86
Tabla 2.21: Coeficiente de expansión térmica de algunos metales	86
Tabla 2.22: Coeficiente de expansión térmica para plásticos	87
Tabla 3.1: Resumen de resultado de esfuerzos	153
Tabla 4.1 Características de rangos de la temperatura homóloga	157
Tabla 4.2 Variación de esfuerzo y factor de seguridad para distintas temperaturas de funcionamiento molde rectangular	163
Tabla 4.3 Variación de esfuerzo y factor de seguridad para distintas temperaturas de funcionamiento molde cuadrado	168

Tabla 6.1 Prueba preliminar de funcionamiento	183
Tabla 6.2 Variación de la frecuencia y tipo de enfriamiento	186
Tabla 6.3 Comportamiento del material a la superficie de enfriamiento	189
Tabla 6.4 Variación de la temperatura de entrada y salida	191
Tabla 6.5 Variación de la temperatura de entrada y salida	194
Tabla 6.6 Variación del flujo másico perfil rectangular	196
Tabla 6.7 Proceso de extrusión de plástico mas fibras perfil rectangular	199
Tabla 6.8 Variación de la frecuencia y temperatura constante	202
Tabla 6.9 Variación del Flujo másico perfil cuadrado	205
Tabla 6.10 Proceso de extrusión de plástico mas fibras perfil cuadrado	207
Tabla 6.11 Tiempos en el proceso de extrusión	209
Tabla 6.12 Proceso de extrusión con boquilla de paredes rectas	210

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Proceso de reciclado mecánico y químico	9
Figura 2.2: Estados de termoplásticos amorfos	11
Figura 2.3: Estados de los termoplásticos cristalinos	11
Figura 2.4: Diseño genérico de un extrusor	28
Figura 2.5: Zonas en el proceso de extrusión	29
Figura 2.6: Esquema del charco fundido	32
Figura 2.7: Esquema de características del tornillo	33
Figura 2.8: Esquema del flujo total	35
Figura 2.9: Línea característica del extrusor de tornillo	39
Figura 2.10: Interacción de las líneas características del tornillo y del dado	40
Figura 2.11: Familia de líneas características de tornillo con diversas interacciones de dado	41
Figura 2.12: Diferentes acoplamientos de líneas características de tornillo y dado	41
Figura 2.13: Husillo con una zona de compresión creciente	43
Figura 2.14: Tornillo para polietileno	44
Figura 2.15: Productos de plástico y aserrín	47
Figura 2.16: Producto de plástico y fibra de vidrio	48
Figura 2.17: Producto de plástico y fibras naturales	49
Figura 2.18: Resistencia a la corrosión para Stavax ESR	54
Figura 2.19: Dureza – Temperatura del revenido para el acero BÖHLER M238	58
Figura 2.20: Resistencia a la tracción – Temperatura de revenido para el acero BÖHLER M238	58
Figura 2.21: Dureza – Temperatura del revenido para el Acero BÖHLER M201	60
Figura 2.22: Resistencia a la tracción – temperatura de revenido para el Acero BÖHLER M201	61

Figura 2.23: Resistencia a la tracción – Temperatura de revenido para el acero BÖHLER V945 (AISI 1045)	63
Figura 2.24: Resistencia a la fluencia – Temperatura de revenido para el acero BÖHLER V945 (AISI 1045)	63
Figura 2.25: Patrones de un dado para varilla	65
Figura 2.26: Flujos paralelos y convergentes	65
Figura 2.27: Esquema del molde de extrusión	66
Figura 2.28: Esquema del torpedo	68
Figura 2.29: Esquema de la boquilla	69
Figura 2.30: Ángulo fluido cónico	69
Figura 2.31: Abambuamiento a la salida del molde	72
Figura 2.32: Comparación de la forma del material en la hilera y extruido	73
Figura 2.33: Perfiles de ciertas cámaras de descarga	74
Figura 2.34: Esfuerzo tridimensional	76
Figura 2.35: Circulo de Mohr	78
Figura 2.36: Distribución del esfuerzo tangencial y radial para un cilindro de pared gruesa que se somete a presión interna	81
Figura 2.37: Transferencia de calor por conducción	83
Figura 2.38: Transferencia de calor por convección	84
Figura 2.39: $V_{\text{especifico}}$ – Temperatura	89
Figura 2.40: Contorno después de la contracción	90
Figura 2.41: Evolución de las dimensiones con el tiempo	91
Figura 2.42: Temperatura - $V_{\text{especifico}}$ para materiales amorfos y semi-cristalinos	92
Figura 2.43: Influencia de los refuerzos de fibra	93
Figura 2.44: Variación de la contracción al aumentar la temperatura	94
Figura 2.45: Variación de la contracción y post-contracción	94
Figura 2.46: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido newtoniano	97
Figura 2.47: Tasa de deformación – Esfuerzo cortante en fluidos	98
Figura 2.48: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido plástico	99

Figura 2.49: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido pseudoplástico	100
Figura 2.50: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido dilatante	101
Figura 2.51: Tubo de corriente de sección recta variable	103
Figura 2.52: Fluido entre dos caras transversales	104
Figura 2.53: Tubería con disminución de área	106
Figura 2.54: Nodos	110
Figura 3.1: Moto-reductor	121
Figura 3.2: Sistema piñón, rueda y cadena	122
Figura 3.3: Tornillo simple	122
Figura 3.4: Bandas calefactoras	123
Figura 3.5: Termocuplas	123
Figura 3.6: Interruptores	123
Figura 3.7: Controladores digitales	124
Figura 3.8: Variador de frecuencia	124
Figura 3.9: Zonas del tornillo en el proceso de extrusión	125
Figura 3.10: Croquis cuerpo del molde	131
Figura 3.11: Operación de recubrir para modelar el trompo	131
Figura 3.12: Vista de cámara de relajación con líneas ocultas visibles	132
Figura 3.13: Croquis Frontal cámara de descarga molde rectangular	132
Figura 3.14: Croquis cara posterior cámara de descarga molde rectangular	133
Figura 3.15: Croquis cámara de descarga molde cuadrado	133
Figura 3.16: Molde rectangular	134
Figura 3.17: Molde cuadrado	134
Figura 3.18: Parámetros generales CosmosFloWorks	135
Figura 3.19: Fluido no newtoniano CosmosFloWorks	135
Figura 3.20: Material del molde CosmosFloWorks	136
Figura 3.21: Condiciones iniciales CosmosFloWorks	136
Figura 3.22: Parámetros termodinámicos CosmosFloWorks	137
Figura 3.23: Condiciones de entrada molde rectangular	138
Figura 3.24: Condiciones de salida molde rectangular	138

Figura 3.25: Distribución de presiones molde rectangular	139
Figura 3.26: Distribución de velocidades molde rectangular	140
Figura 3.27: Flujo másico – iteraciones para molde rectangular	140
Figura 3.28: Condiciones de entrada molde cuadrado	141
Figura 3.29: Condiciones de salida molde cuadrado	141
Figura 3.30: Distribución de presiones molde cuadrado	142
Figura 3.31: Distribución de velocidades molde cuadrado	142
Figura 3.32: Flujo másico – iteraciones para molde cuadrado	143
Figura 3.33 Esfuerzo – deformación de los metales	145
Figura 3.34: Distribución de cargas molde rectangular	146
Figura 3.35: Distribución de cargas molde cuadrado	147
Figura 3.36: Distribución del esfuerzo de Von Mises para molde rectangular	148
Figura 3.37: Distribución del esfuerzo de Von Mises para molde cuadrado	149
Figura 3.38: Distribución de la deformación para el molde rectangular	150
Figura 3.39: Distribución de la deformación para el molde cuadrado	150
Figura 3.40: Distribución de la deformación unitaria para molde rectangular	152
Figura 3.41: Distribución de la deformación unitaria para molde cuadrado	152
Figura 4.1: Ductilidad y resistencia a la tracción en función de la temperatura de un acero al carbón	156
Figura 4.2: Distribución del factor de seguridad molde rectangular	159
Figura 4.3: ISO superficie a esfuerzos mayores a 350 MPa molde rectangular	160
Figura 4.4: ISO superficie a esfuerzos mayores a 390 MPa molde rectangular	161
Figura 4.5: ISO superficie a esfuerzos mayores a 499 MPa molde rectangular	162
Figura 4.6: ISO superficie de distribución del FS entre 1.6 y 2.2 molde rectangular	163

Figura 4.7 Distribución del factor de seguridad molde cuadrado	164
Figura 4.8: ISO superficie a esfuerzos mayores a 355 MPa molde cuadrado	165
Figura 4.9: ISO superficie a esfuerzos mayores a 402 MPa molde cuadrado	166
Figura 4.10: ISO superficie a esfuerzos mayores a 450 MPa molde cuadrado	167
Figura 4.11: ISO superficie a esfuerzos mayores a 508 MPa molde cuadrado	168
Figura 5.1: Eje de acero AISI 1045	170
Figura 5.2: Torneado	170
Figura 5.3: Verificación de medidas	171
Figura 5.4: Primera fase de torneado para la boquilla	171
Figura 5.5: Revisión de medidas	172
Figura 5.6: Cámara de almacenamiento	172
Figura 5.7: Cámara de relajación	172
Figura 5.8: Perforaciones del torpedo	173
Figura 5.9: Cámara de descarga	173
Figura 5.10: Hilo de tungsteno	174
Figura 5.11: Archivo en maquina de electroerosión	175
Figura 5.12: Archivo del plano de fabricación cargado el maquina de electroerosión	175
Figura 5.13: Colocación del hilo	176
Figura 5.14: Proceso de centrado en la máquina de electro erosión	176
Figura 5.15: Corte de las boquillas por electro erosión	177
Figura 5.16: Proceso de fresado	177
Figura 5.17: Boquillas después del desbaste con la fresadora	178
Figura 6.1 Desmontaje carcasa de la extrusora	180
Figura 6.2 Desmontaje partes de la extrusora	181
Figura 6.3 Desmontaje tornillo del cilindro	181
Figura 6.4 Limpieza del tornillo	182

Figura 6.5 Lubricación del rodamiento	182
Figura 6.6 Montaje del molde	182
Figura 6.7 Distorsiones a la salida de la boquilla	185
Figura 6.8 Contracciones del material extruido	185
Figura 6.9 Irregularidades a la salida del molde	185
Figura 6.10 Variación del perfil rectangular	185
Figura 6.11 Comportamiento del material extruido al ser enfriado con agua	189
Figura 6.12 Franjas del material extruido	190
Figura 6.13 Comportamiento del material al enfriamiento brusco	190
Figura 6.14 Incrustaciones en el material extruido	192
Figura 6.15 Inclinación del perfil en el proceso de extrusión	192
Figura 6.16 Uniformidad en el perfil	192
Figura 6.17 Contracciones del perfil extruido	193
Figura 6.18 Frecuencia – Flujo másico perfil rectangular	198
Figura 6.19 Porosidades del material extruido	204
Figura 6.20 Forma del material extruido	204
Figura 6.21 Frecuencias – flujo másico perfil cuadrado	206
Figura 6.22 Forma de la sección cuadrada extruida	206
Figura 6.23 Burbujas en el proceso de extrusión	208

NOMENCLATURA

a	Ángulo de entrada
A	Área
D	Diámetro exterior del tornillo
D _d	Diámetro del orificio del dado
D _b	Diámetro del agujero del barril del extrusor
F	Factor de corrección del flujo de arrastre
g	Gravedad
H	Altura de canal del tornillo
l _w	Dimensión de la cavidad del molde
l _F	Dimensión de la pieza moldeada
K	Factor de restricción de forma
L	Longitud total del tornillo
L _o	Longitud inicial del miembro
L _a	Largo de la abertura
L _m	Longitud de la zona de dosificación
N	Velocidad de giro del husillo
P	Presión
P _{max}	Presión máxima
P _e	Longitud paralela del dado
P _o	Presión de operación
p _i	Presión interna
Q _d	Flujo de arrastre
Q	Flujo de plástico
R	Radio abertura
r _i	Radio interno cilindro
r _e	Radio externo cilindro
S _v	Contracción volumétrica
S _L	Contracción longitudinal
S _w	Contracción transversal

S_e	Contracción del espesor
S_l	Contracción lineal
S	Distancia
V_C	Volumen de la cavidad del molde
V_P	Volumen de la pieza moldeada
v	Velocidad
W	Ancho abertura
Φ	Ángulo de hélice
γ	Velocidad de corte
η	Viscosidad
ρ	Densidad
α	Constante para reducción de formula de flujo
α	Coefficiente de expansión térmica
β	Constante para reducción de formula de flujo
λ	Viscosidad extensional
σ_1	Esfuerzo normal máximo
σ_2	Esfuerzo normal mínimo
σ_t	Esfuerzo tangencial
σ_r	Esfuerzo tangencial
σ_i	Esfuerzo interno en cilindro de pared gruesa
σ_x	Esfuerzo en el eje x
σ_y	Esfuerzo en el eje y
ζ_y	Esfuerzo en el umbral para que el flujo se ponga en movimiento
ζ	Esfuerzo cortante
μ_v	Energía de deformación
μ_d	Energía de distorsión
ε_T	Expansión térmica
ΔT	Cambio de temperatura

ANEXOS Y PLANOS

ANEXOS.

A. Planos de la máquina

A.1. Planos constructivos

A.2. Planos de conjunto

RESUMEN

El presente proyecto tiene como principal objetivo fomentar el reciclaje de materiales plásticos, específicamente polietileno de alta y baja densidad, y así disminuir el impacto ambiental que estos generan. La extrusión de plásticos es un proceso industrial, en donde se realiza una acción de prensado y moldeado del plástico, que por flujo continuo con presión y empuje, se lo hace pasar por un molde encargado de darle la forma deseada

La etapa principal del proyecto fue el diseño y la construcción de los moldes, para obtener perfiles cuadrados y rectangulares de plástico reciclado más fibras, para llegar a cumplir esta meta, se realizó un estudio de los datos técnicos, de la extrusora existente en el Laboratorio de Mecánica de Materiales (L.M.M), con estos se pudo establecer condiciones térmicas y mecánicas a las que estarán sometidos estos moldes.

Previo una investigación de los materiales existentes en nuestro medio, para la fabricación de moldes, se seleccionó un material adecuado y se realizó la simulación mecánica y térmica de estos en el programa SolidWorks, mientras que la simulación del flujo fue realizada en el programa CosmosFloWorks. Con los datos obtenidos y asegurándonos de obtener factores de seguridad apropiados para estos moldes, se procedió a la construcción de los mismos, en donde se aplico procesos de manufactura como, torneado, fresado, y electro erosión.

Después de seleccionar y moler, los envases fabricados a base de polietileno de alta y baja densidad, con la finalidad de mejorar las propiedades físicas y químicas de los perfiles plásticos, se procedió al lavado y secado de los gránulos.

El proceso de extrusión se lo hace variando los siguientes parámetros: temperatura, frecuencia, porcentaje de fibras y medio de enfriamiento. Con esos datos se presentan tablas comparativas y conclusiones operativas del proceso de tal forma que se tiene las características ideales para obtener los perfiles rectangulares y cuadrados.

INTRODUCCIÓN

El plástico es difícilmente biodegradable y por esta razón se convierte en un producto altamente contaminante. El reciclaje de plásticos es una opción muy útil para reducir los desperdicios sólidos, tanto para la protección del ambiente y la conservación de los recursos naturales, sin embargo los productos reciclados deben ser capaces de cumplir con las características del desempeño requeridas para su aplicación.

Con esta premisa, miembros de la CIME-ESPE, nos hemos propuesto desarrollar el proyecto que tiene como finalidad, implementar nuevas metodologías de reciclaje, como es la extrusión, de mezcla de plástico y fibras, con este proyecto además se pretende sentar una base en el país, para desarrollar y crear empresas dedicadas a la reutilización de plástico en la fabricación de postes y viguetas, que remplazarían a los que en la actualidad son hechos de madera.

La extrusión es un proceso por el cual el plástico de desecho se mezcla con fibras, para luego ser fundido y comprimido, posteriormente se bombea a través de una boquilla, que da al material fundido la forma que se desea obtener mediante un proceso continuo. La finalidad en este proyecto es obtener perfiles cuadrados y rectangulares, que podrán ser usados como madera plástica.

Otros motivos para la elaboración de estos perfiles es el disminuir el impacto ambiental que los plásticos generan, Una botella de plástico demora en degradarse entre 100 y 1000 años, causando esto un daño irreparable para nuestro ecosistema

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

Anualmente, en el mundo se producen cerca de 60000 millones de toneladas de plástico, en especial envases, fundas y envolturas, por eso, la generación de estos desechos se ha vuelto imparable. De las 1 500 toneladas de basura que se generan a diario en Quito, el 14% es plástico, el consumo desenfrenado y la falta de un procesamiento final adecuado generan graves problemas para el planeta. Se calcula que solo entre el 3% y 5% de los productos plásticos se recicla. El resto acaba a la intemperie, en los botaderos o sepultado en los rellenos.

Los plásticos utilizados habitualmente en la industria, e incluso en la vida cotidiana, son productos con una muy limitada capacidad de autodestrucción, en consecuencia, quedan durante muchos años como residuos, provocando así una gran contaminación. Por otra parte, los plásticos se obtienen a partir de derivados del petróleo, un producto cada vez más caro y escaso. Con estos antecedentes es importante y necesario la recuperación y reutilización de los residuos plásticos.

Estados Unidos, Brasil, Perú, Colombia y países europeos extruyen mezclas de plásticos mas fibras naturales desde hace 25 años, obteniendo productos como viguetas y postes utilizados para, cerramientos de terrenos, bancas para parques, basureros, casetas de guardianía, cajones para camionetas, etc., estos productos muestran numerosas ventajas tanto técnicas como ambientales, como son su resistencia, inalterabilidad y contribución al reciclado de residuos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se estima que el consumo de los plásticos en la sociedad moderna crece un 4% anualmente, este espectacular aumento hace que sea uno de los productos de consumo más importantes en nuestra vida diaria, pero que sucede en el momento que lo desechamos, si bien el 90% de los plásticos es reutilizable o reciclable, en ciudades como Quito, que carecen de un programa de reciclaje, se convierte en un problema, la recolección y disposición final de estos, pues representan una tarea compleja y costosa debido a la cantidad de envases, y el volumen que estos representan.

El Ecuador no cuenta con estudios de extrusión de mezclas de plásticos más fibras. Con los estudios que estamos realizando se crea una base en el país para crear empresas con este fin.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. GENERAL

Simular, diseñar y construir moldes para extruir mezclas de plástico de desecho más fibras para la extrusora del Laboratorio de Mecánica de Materiales (L.M.M).

1.3.2. ESPECÍFICOS

- Realizar un marco teórico sobre el reciclado, mediante el proceso de extrusión de plásticos de desecho mas fibras, además un análisis de los materiales utilizados en moldes para extrusión de plásticos.
- Realizar un estudio de materiales existentes en nuestro medio para la fabricación de moldes que se puedan conseguir en nuestro país.

- Diseñar moldes para extruir mezcla de plásticos de desecho más fibras para obtener perfiles cuadrados y rectangulares.
- Simular mecánicamente utilizando el programa SolidWorks el proceso de extrusión en el molde de una extrusora.
- Simular termodinámicamente utilizando el programa SolidWorks el proceso de extrusión en el molde de una extrusora.
- Simular el flujo utilizando el programa CosmosFloWorks la mezcla de plásticos de desecho más fibras a través del molde de una extrusora.
- Probar en forma preliminar lo simulado.
- Construir moldes para obtener perfiles cuadrados y rectangulares.
- Verificar el correcto funcionamiento de los moldes construidos.
- Realizar un análisis económico del proyecto.

1.4. ALCANCE

El presente proyecto tiene como alcance desarrollar moldes para obtener perfiles cuadrados y rectangulares mediante la extrusión de plásticos de desecho más fibras; basados en simulaciones que nos permitan tener una idea del comportamiento del material en este tipo de procesos. Además realizar ensayos con los moldes construidos y obtener parámetros que nos permitan saber las condiciones ideales de operación.

Estos análisis permitirán desarrollar proyectos a gran escala que beneficien al sector público y a los municipios locales, pues se brinda una opción a la eliminación de residuos que actualmente no se aprovechan y por el contrario son considerados desechos inútiles. El proyecto presenta la fabricación de perfiles con numerosas ventajas tanto técnicas como ambientales, como son su resistencia, inalterabilidad y contribución al reciclado de residuos; además al reutilizar estos productos permite prolongar la vida útil de los rellenos sanitarios

Por otro lado la ESPE tendrá un documento que pretende ser el inicio de una serie de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico y de esta manera ser catalogada como una entidad elite en la solución a diversos problemas que presenta el sector medioambiental del país, además de promover la transferencia tecnológica a la sociedad, así la ESPE demostrará una vez más la utilidad y aplicabilidad de los cursos que imparte a nivel académico.

1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Sentar las bases para desarrollar y crear empresas, que tengan como objetivo la reutilización de plásticos, mediante la extrusión de los mismos.

En nuestro medio no existen técnicos capacitados para que realicen la simulación, diseño y construcción de moldes para la extrusión de plásticos adecuadamente. Existen técnicos que construyen moldes para extruir plásticos vírgenes pero no plásticos de desecho más fibras naturales.

La importancia del reciclaje de plásticos de desecho, radica en que hoy en día estos están siendo depositados en rellenos sanitarios, debido al gran volumen que ocupan y el extenso periodo de degradación de estos, se disminuye el tiempo de vida de los rellenos, provocando así, grandes problemas para los municipios locales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. RECICLAJE DE PLÁSTICOS

2.1.1. INTRODUCCIÓN

El problema ambiental se ha venido dando en el mundo aproximadamente desde hace 20 años. La sociedad acostumbrada a la utilización de un cierto tipo de materiales y productos se encontró de pronto sumergida en un ambiente neoliberal consumista que le proveía cada día de productos nuevos que hacían la vida relativamente más cómoda, mas fácil y más placentera. La cultura del desechable, líder en esta etapa contaminante fue exitosamente recibida por consumidores seducidos por la practicidad del: Úsese y tírese.

Actualmente cuesta trabajo imaginar ciertos aspectos de nuestra vida sin la posibilidad de utilizar artículos desechables y debido a las características de los mismos y a la cultura ya establecida, el comercio de dichos productos no disminuye y sigue ganando terreno a otros productos que representan algún tipo de trabajo después de usarlos. Sin embargo así como la cultura del desechable llevo para quedarse, es necesario que otra cultura haga contrafuerte a la misma, logrando mantener un crecimiento sustentable. La cultura que hay que promover es la del reciclaje.

El plástico es sin duda uno de los materiales de la modernidad y gracias a sus innumerables usos y características va ganando terreno a otros anteriormente usados. En cuanto a la cultura del reciclaje, esta ya ha demostrado desde hace varios años ser una alternativa rentable, sin embargo en el Ecuador no se tiene registro de programas exitosos de reciclaje masivo y sostenido. Por otro lado el mercado que existe para el material de desecho es sumamente reducido y la

utilización de materiales reciclados en la producción de nuevos artículos no se fomenta. No hay cultura de separación y la política tampoco ayuda al establecimiento de dichos programas. Se han tenido iniciativas importantes en diversas localidades y se puede notar un fuerte interés ecológico en la sociedad, así como una preocupación por la situación que guarda la ecología. Sin embargo los intentos no han sido premiados con la permanencia, y los volúmenes de basura desechados avanzan a velocidades dignas de alarma. Los recursos naturales se continúan agotando y el contexto ecológico cada día es más preocupante.

El material plástico tiene varios puntos a favor; es económico, liviano, funcional, dúctil, duradero, además de ser un aislante eléctrico y acústico. Pero a la hora de hablar de reciclaje este presenta muchos inconvenientes.

Para reciclar plástico, primero hay que clasificarlos de acuerdo con la resina. Es decir, en 7 clases distintas: PET, PEAD, PVC, PEBD, PP, PS y una séptima categoría denominada "otros". La separación es debida a que, las resinas que componen cada una de las categorías de plástico son termodinámicamente incompatibles unas con otras. A eso hay que sumarle el trabajo de separar las tapas, que generalmente no están hechas del mismo material. Este no es el único inconveniente; en el proceso de reciclaje el plástico pierde algunas de sus propiedades originales, por lo que hay que agregarle una serie de aditivos para que recupere sus propiedades.

2.1.2. TIPOS DE RECICLAJE

Hay cuatro tipos de reciclaje de plásticos: primario, secundario, terciario y cuaternario. El conocer cuál de estos tipos se debe usar depende de factores tales como la limpieza, homogeneidad del material, valor del material de desecho y la aplicación final que se le espera dar a este.

2.1.2.1. Reciclaje Primario

Consiste en la conversión del desecho plástico en artículos con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original. El reciclaje primario se hace con termoplásticos como PET, PEAD, PEBD, PS y PVC. El proceso se lo realiza en los siguientes pasos:

- Separación: Los métodos de separación pueden ser clasificados en separación macro, micro y molecular. La macro separación se hace sobre el producto completo usando el reconocimiento óptico del color o la forma. La micro separación puede hacerse por una propiedad física específica: tamaño, peso, densidad, etc.
- Granulado: Por medio de un proceso industrial, el plástico se muele y convierte en gránulos parecidos a las hojuelas del cereal.
- Limpieza: Los plásticos granulados están generalmente contaminados con comida, papel, piedras, polvo, pegamento, de ahí que deben limpiarse primero.
- Pele tizado: Para esto, el plástico granulado debe fundirse y pasarse a través de un tubo delgado para tomar la forma de spaghetti al enfriarse en un baño de agua. Una vez frío es cortado en pedacitos llamados pellets.

2.1.2.2. Reciclaje Secundario

En este tipo de reciclaje se convierte el plástico en artículos con propiedades que son inferiores a las del polímero original. Ejemplos de estos plásticos recuperados por esta forma son los termoestables o plásticos contaminados. Este proceso elimina la necesidad de separar y limpiar los plásticos, en vez de esto, se mezclan incluyendo tapas de aluminio, papel, polvo, etc.; se muelen y funden juntas dentro de un extrusor. Los plásticos pasan por un tubo con una gran abertura hacia un

baño de agua y luego son cortados a varias longitudes dependiendo de las especificaciones del cliente.

2.1.2.3. Reciclaje Terciario

Este tipo de reciclaje degrada el polímero a compuestos químicos básicos y combustibles. Es diferente a los dos primeros porque involucra además de un cambio físico un cambio químico. Hoy en día el reciclaje terciario cuenta con dos métodos principales. Pirolisis y gasificación. En el primero se recuperan las materias primas de los plásticos, de manera que se puedan rehacer polímeros puros con mejores propiedades y menos contaminación. Y en el segundo, por medio del calentamiento de los plásticos se obtiene gas que puede ser usado para producir electricidad, metanol o amoníaco.

2.1.2.4. Reciclaje cuaternario

Consiste en el calentamiento del plástico con el objeto de usar la energía térmica liberada de este proceso para llevar a cabo otros procesos, es decir el plástico es usado como combustible para reciclar energía. Las ventajas: mucho menos espacio ocupado en los rellenos sanitarios, la recuperación de metales y el manejo de diferentes cantidades de desechos. Sin embargo, una de las desventajas es la generación de contaminantes gaseosos.

2.1.3. RECICLAJE MECÁNICO

Solamente se pueden reciclar mecánicamente los termoplásticos (PEAD, PEBD, PP, PET, PS). El plástico recuperado, convenientemente prensado y embalado, llega a la planta de reciclado donde comienza la etapa de regenerado del material. Las fases del reciclado mecánico son las siguientes:

- Triturado o molido
- Lavado (purificación)
- Extrusión
- Granceado (Colocar aditivos)

2.1.4. RECICLAJE QUÍMICO

Los envases se descomponen por procesos químicos en componentes sencillos que pueden ser utilizados como materias primas para obtener otros productos como aceite, grasas, monómeros, etc. El reciclado químico puede efectuarse por medio de diversas técnicas: pirolisis, hidrogenación, gasificación y tratamiento con disolventes como se muestra en la Figura 2.1.

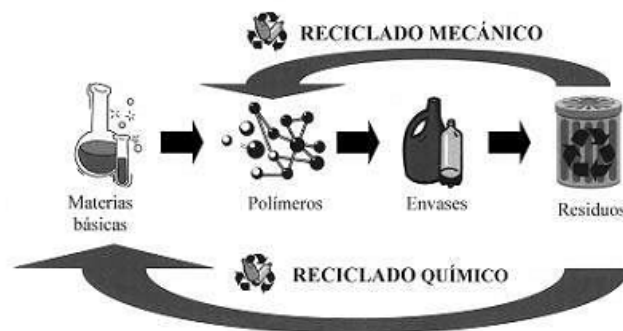


Figura 2.1 Proceso de reciclado mecánico y químico ^[2.1]

2.1.5. VENTAJAS DEL RECICLAJE DE PLÁSTICOS

- Ahorro de materias primas y energía.
- Reduce cantidad de residuos al tratar por otro sistema.
- Disminuye el impacto ambiental o alteración del paisaje que suponen los plásticos dispersados por el suelo.

El reciclado de los plásticos en nuestro país prácticamente no se realiza, debido a los costos que implican los procesos para poder realizarlos. Por esta causa este proyecto pretende dar inicio al análisis y procesamiento de plástico desechado.

2.2. CAMBIOS FÍSICOS DE LOS PLÁSTICOS POR EFECTO DE LA TEMPERATURA

2.2.1. TERMOPLÁSTICOS

Los materiales termoplásticos, están constituidos por largas cadenas de monómeros, y tienen las características que pueden ser calentados a temperaturas que pueden oscilar entre los 180 y 250° C, temperatura en la que se alcanzan un estado líquido y pueden ser moldeados con cierta facilidad.

Se vuelven quebradizos a bajas temperaturas, estas son específicas para cada uno de ellos. Si las temperaturas aumentan, se produce un descenso constante del módulo de elasticidad, es decir, disminuye la rigidez. Al aplicar calor continuo a los termoplásticos amorfos, estos sufren un reblandecimiento, que viene a ser la transición a un estado termo elástico.

Con pequeñas fuerzas se provocan grandes deformaciones; si se sigue calentando se incrementa la movilidad térmica de las moléculas provocando que las cadenas puedan deslizarse unas frente a otras. Esta zona limita con la temperatura de descomposición. En la Fig. 2.2 se muestra que a una temperatura menor a la Transición vítrea (T_g) el plástico posee características como rigidez, fragilidad y transparencia. A una temperatura mayor a T_g pasa de polímero rígido a flexible y blando.

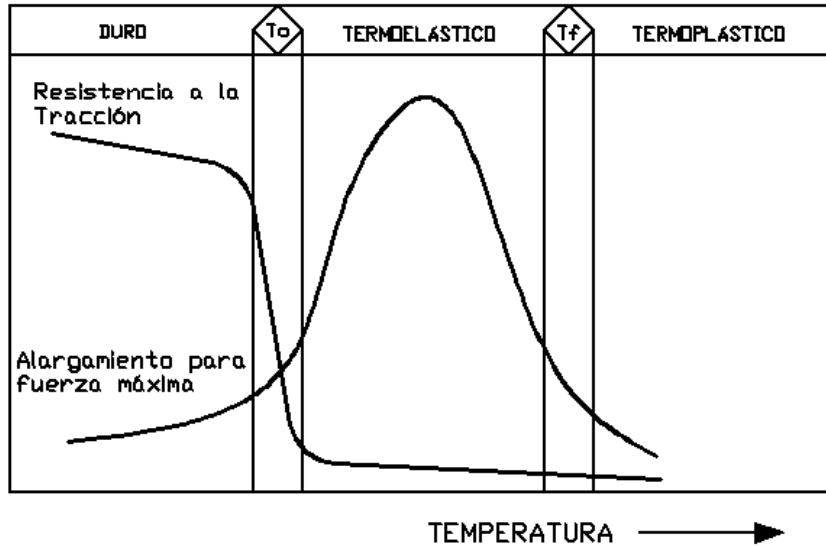


Figura 2.2 Estados de termoplásticos amorfos [2.2]

Los termoplásticos semi-cristalinos poseen fragmentos amorfos (flexibles) en el intervalo de temperaturas de uso así como cristalinos (rígidos). Al aumentar la temperatura es posible moldearlos cuando los fragmentos cristalinos alcanzan el intervalo de la temperatura de fusión. Inmediatamente sigue el estado termoplástico y al seguir aumentando la temperatura, este estado se caracteriza por la transparencia que adopta el plástico antes opaco. Esta zona limita la temperatura de descomposición del plástico como muestra la Fig. 2.3.

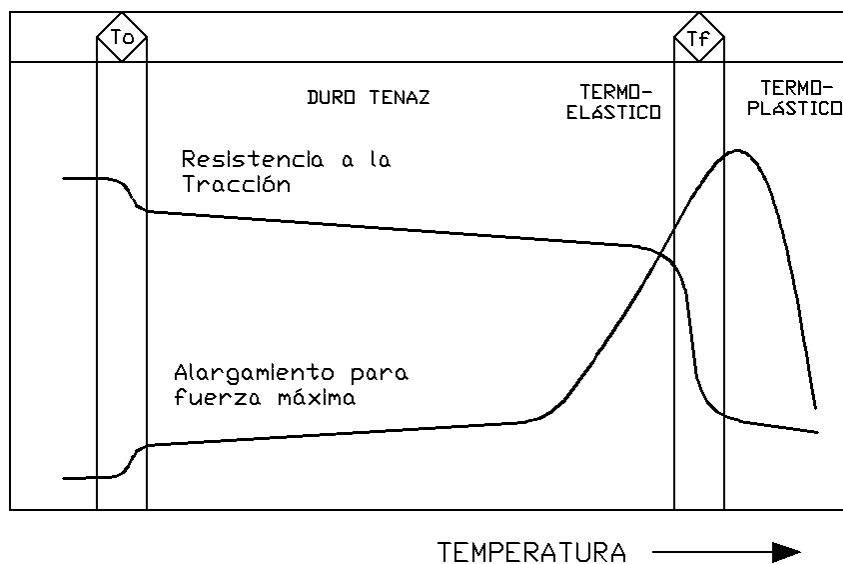


Figura 2.3 Estados de los termoplásticos semi-cristalinos [2.3]

Por su misma estructura los termoplásticos semi-cristalinos, sufren una dilatación volumétrica relativamente grande con el aumento de temperatura. En los plásticos reforzados esta dilatación es menor, y está en función del tipo y cantidad de material de refuerzo. Como ya se mencionó, los electrones de los plásticos carecen de movilidad, por ello, son materiales con conductividad térmica baja, siendo aislantes térmicos, además poseen las siguientes características.

- Duro en frío
- Reblandecen y fluyen al calentarlos
- Después de calentarlos recupera sus propiedades iniciales una vez que se hayan enfriado.
- Se pueden conformar con calor tantas veces como se precise.

2.2.1.1. Polietileno (PE)

Son termoplásticos semi cristalinos. Se destacan en general por una buena resistencia química, alta tenacidad y elongación en la rotura, así como buenas propiedades de aislamiento eléctrico. En la tabla 2.1 se muestra las propiedades físicas del polietileno de baja y alta densidad (PE-LD y PE-HD respectivamente).

Tabla 2.1 Parámetros de comparación entre PE-LD y PE-HD ^[2.1]

Parámetros de comparación	PE-LD	PE-HD
Grado de cristalización %	40 a 50	60 a 80
Densidad g/cm ³	0.915 a 0.94	0.94 a 0.965
Módulo de cizallamiento	+/-130	+/- 1000
N/mm ²	105 a 110	130 a 135
Rango de fusión cristalina °C	buena	Mejor
Resistencia química		

Los polímeros basados en etileno se producen en amplia variedad. Por ello se obtiene un muy variado cuadro de propiedades, a ello hay que agregarle

posibilidades de modificación por medio de la fabricación de co-polimerizados y aleaciones poliméricas, de ahí que solo se puedan mencionar solamente las propiedades típicas.

- Baja densidad
- Alta tenacidad y elongación en la rotura
- Estabilidad térmica de -50 a $+900$ °C
- Color natural: lechoso
- Muy buen comportamiento de aislamiento eléctrica
- Baja absorción de agua
- Buena procesabilidad y formabilidad
- El PE es resistente a los ácidos, álcalis, soluciones salinas, agua, alcoholes, aceites (el PE-HD también es resistente a la gasolina) y, por debajo de los 60 °C es prácticamente insoluble en casi todos los solventes orgánicos.
- El PE no es resistente a los oxidantes fuertes (sobre todo a altas temperaturas), el PE-LD se hincha en hidrocarburos aromáticos y alifáticos.

2.2.1.2. Polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE)

El PEBD tiene una estructura en su mayor parte amorfa. Es un material traslucido, inodoro, su punto de fusión varía dependiendo del grado de la resina, como promedio en 110 °C tiene una conductividad térmica baja como la mayoría de los materiales termoplásticos. Las propiedades mecánicas del polietileno de baja densidad, dependen del grado de polimerización y la configuración molecular, es decir, cuanto más elevado sea el peso molecular, mejores serán las propiedades. La naturaleza no polar del polietileno, le confiere gran resistencia a los ataques de sustancias químicas. A temperaturas menores de 60 °C, resiste a la mayoría de los solventes, ácidos, bases y sales en cualquier concentración. Por otro lado a temperaturas mayores es soluble en solventes orgánicos alifáticos y especialmente en los aromáticos y clorados.

Sus aplicaciones son en bolsas de supermercados, boutiques, panificación, congelados e industriales; películas para agro (recubrimiento de acequias); embasamiento automático de alimentos y productos industriales como leche, agua, etc.

2.2.1.3. Polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE)

El polietileno de alta densidad es un material opaco y de aspecto ceroso, las propiedades de cristalinidad y mayor densidad se relacionan con las moléculas más empacadas, ya que casi no existen ramificaciones.

La rigidez, dureza y resistencia a la tensión de los polietilenos, se incrementa con la densidad, el PEAD presenta mejores propiedades mecánicas que el PEBD, también presenta fácil procesamiento y buena resistencia al impacto y a la abrasión. El calor necesario para llegar al punto de fusión, está relacionado con la cristalinidad. El polietileno de alta densidad, muestra un punto de fusión entre 120 °C y 136 °C. El PEAD tiene excepcional resistencia a sustancias químicas y otros medios. No es atacado por soluciones acuosas, salinas, ácidos y álcalis. La solubilidad del polietileno en hidrocarburos alifáticos, aromáticos y clorados, depende de la cristalinidad, pero a temperaturas elevadas el PEAD es soluble en estos.

Sus aplicaciones son en envases de detergentes, aceites de motor, shampoo, lácteos, bolsas para supermercados y bazar; cajones para pescados, gaseosas y cervezas; baldes para pintura, helados y aceites; cañería para gas, telefonía, agua potable, minería y drenaje.

2.2.1.4. Polipropileno (PP)

El polipropileno se obtiene por polimerización y pertenece al grupo de los termoplásticos semi cristalinos y sus propiedades son:

- Baja densidad
- Alta rigidez, dureza y resistencia
- Resistencia térmica hasta + 100 °C
- Opaco, incoloro
- Las propiedades eléctricas son comparables a las del PE
- El PP es resistente a los ácidos o álcalis inorgánicos débiles, alcoholes, algunos aceites y lejías
- El PP no es resistente a los oxidantes fuertes ni a los hidrocarburos halogenados. Se hincha en hidrocarburos alifáticos y aromáticos como la gasolina o el benceno (principalmente a altas temperaturas).
- Solamente con la correspondiente estabilización, el PP es resistente a la radiación UV.

2.2.1.5. Policloruro de vinilo (PVC)

Se presenta como un material blanco que comienza a reblandecer alrededor de los 80 °C y se descompone sobre 140 °C. Cabe mencionar que es un polímero por adición y además una resina que resulta de la polimerización del cloruro de vinilo o cloro-etileno. Tiene una muy buena resistencia eléctrica y a la llama.

- Tiene una elevada resistencia a la abrasión, junto con una baja densidad (1,4 g/cm³), buena resistencia mecánica y al impacto, lo que lo hace común e ideal para la edificación y construcción.
- Al utilizar aditivos tales como estabilizantes, plastificantes entre otros, el PVC puede transformarse en un material rígido o flexible
- Es un material altamente resistente, los productos de PVC pueden durar hasta más de sesenta años como se comprueba en aplicaciones tales como tuberías para conducción de agua potable y sanitarios

- Debido a las moléculas de cloro que forman parte del polímero PVC, no se quema con facilidad ni arde por sí solo y cesa de arder una vez que la fuente de calor se ha retirado.
- Se vuelve flexible y moldeable sin necesidad de someterlo a altas temperatura (basta unos segundo expuesto a una llama) y mantiene la forma dada y propiedades una vez enfriado a temperatura ambiente, lo cual facilita su modificación.
- Alto valor energético. Cuando se recupera la energía en los sistemas modernos de combustión de residuos, donde las emisiones se controlan cuidadosamente, el PVC aporta energía y calor a la industria y a los hogares.

Aplicaciones en envases para agua mineral, aceites, jugos, mayonesa.

2.2.1.6. Poliestireno (PS)

Es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno y sus propiedades son:

- Gran dureza y estabilidad a la forma
- Relativamente alta fragilidad(sobre todo en los tipos de mayor fluidez)
- Gran rigidez, con alta resistencia a la atracción y baja elongación de rotura.
- El PS tiene una resistencia a la deformación al calor de aproximadamente 80°C
- Es transparente en su estado natural(transmisión de aprox. 90 °C)
- Superficie brillante
- Muy buenas propiedades de aislación eléctrica.
- No lo afecta la humedad
- Muy baja absorción de agua
- Es resistente a las bases, álcalis, soluciones salinas, ácidos minerales así como a los detergentes.

- No es resistente a los hidrocarburos clorados, ni aromáticos, tampoco al ácido sulfúrico concentrado, éteres, cetonas ni gasolinas.
- Se amarillea y se vuelve más frágil, cuando se lo expone a la luz solar.
- Tiene tendencia al cuarteo, esto se observa al aire, pero sobretodo en presencia de sustancias aromáticas
- Es insípido, inodoro y fisiológicamente inocuo.

Aplicaciones en sorbetes para lácteos (yogurt, postres, etc.), helados, dulces, envases varios, vasos, bandejas de supermercados, contrapuertas, anaqueles, envases, máquinas de afeitar descartables, platos, cubiertos, bandejas, etc.

2.2.1.7. Politereftalato de etileno (PET)

Son materiales sintéticos termoplásticos de poliéster saturado lineal y sus propiedades son:

- Gran dureza resistencia y excepcional rigidez
- Buena tenacidad, aun en el frío
- Bajo coeficiente de rozamiento, alta resistencia a la abrasión
- Temperatura de uso entre -40 y 100°C
- Color natural blanco, tipos semi cristalinos
- Color natural transparente, tipos amorfos
- Buenas propiedades de aislación eléctrica.
- Baja absorción de agua
- Fisiológicamente inocuo
- Es resistente al agua a temperatura ambiente, ácidos diluidos, sales neutras y ácidas, alcoholes, éter, aceites ,grasas, hidrocarburos, aromáticos y alifáticos
- No es resistente contra álcalis , vapores sobrecalentados , cetonas ,fenoles, éster, ácidos oxidantes e hidrocarburos clorados
- No se cuarteo

- Es resistente a los agentes climáticos y al aire caliente

Envases para gaseosas, aceites, agua mineral, cosmética, frascos varios (mayonesa, salsas, etc.).

2.2.2. TERMOESTABLES

Los materiales termoestables o termofijos también están constituidos por largas cadenas de monómeros ramificados, o lineales, pero unidas por enlaces cruzados, formando estructuras tridimensionales.

Los plásticos termofijos son quebradizos a lo largo de todo el intervalo de temperaturas, no reblandecen y no funden; un poco por debajo de su temperatura de descomposición se observa una pérdida de rigidez. Sus características son:

- No experimentan ninguna variación con el calor
- No se reblandecen, ni fluyen al calentarlos
- Un calentamiento excesivo provoca su descomposición sin haber alterado su forma
- Gran parte de este tipo de plásticos se presentan reforzados, es decir, formados por mezclas de una resma termoestable, con cargas de fibras naturales o sintéticas
- Son duros y fibrosos
- Rompen al impacto con astillamiento del material.

2.2.2.1. Fenol plásticos

El fenol forma una serie de materias plásticas muy conocidas, siendo la bakelita la más importante, obteniéndose al reaccionar en grandes calderas metálicas el fenol y el formaldehído, en presencia de un ácido como catalizador, formándose una resina líquida de color amarillo ámbar, que se solidifica formando grandes masas

llamadas resinoides, siendo el punto de partida para la fabricación de barnices, madera contrachapeada y polvos de moldeo.

2.2.2.2. Fenol colado

Se fabrica análogamente a la bakelita empleando sosa cáustica como catalizador y añadiendo pigmentos para dar color. La resina líquida se vierte en moldes de yeso, vidrio o plomo y una vez solidificado, se introduce en hornos para que se polimerice y endurezca.

2.2.2.3. Urea formaldehído

Estos plásticos se preparan con urea sintética, obtenida del amoníaco y anhídrido carbónico, formaldehído, y empleando un álcali como catalizador. La resina así obtenida se mezcla con rellenos vegetales o minerales y colorantes, análogamente a las resinas fenólicas anteriores, de las que se diferencia porque sus productos tienen un alto grado de transparencia y delicados matices de color, por lo que son muy apreciadas en decoración para creaciones artísticas.

2.2.2.4. Melanina

Se obtiene con cianamida y formaldehído: se parece a las resinas de urea, siendo más resistentes a la humedad, calor y frotamiento, por lo que se utiliza como impermeabilizante de fibras textiles.

2.2.2.5. Silicorresinas o siliconas

Estas modernas resinas termoestables son polímeros de silicio y oxígeno, formando la transición entre las materias plásticas orgánicas e inorgánicas.

Las buenas propiedades de dureza, gran resistencia al calor y aislantes eléctricos de los compuestos de silicio, como, por ejemplo, el vidrio, cuarzo, mica, etc., se

explican porque están formadas por grandes moléculas, cuyas estructuras consisten en átomos de silicio unidos entre si por átomos de oxígeno, formando polímeros análogos a los de carbono, que constituyen los otros tipos de materias plásticas.

2.2.2.6. Materiales plásticos laminados

Se preparan con las materias plásticas antes citadas, tanto para usos industriales como decorativos, impregnando materiales fibrosos, como papel, tejidos de algodón, lana, amianto, vidrio, obteniéndose tableros, tubos y piezas industriales.

Las materias fibrosas se impregnan, generalmente, por inmersión en disoluciones de resinas o materias plásticas, introduciéndolas en una cubeta y haciendo pasar después por laminadores, que, además de quitar el exceso de resina, las comprimen y secan, en grandes prensas hidráulicas, calentadas a 150° y presión de 100-150 Kg./cm². Por el calor y presión, las resinas se endurecen y polimerizan, formando un conjunto muy duro.

2.2.3. POLIETILENO LÍQUIDO

El polietileno de alto peso molecular es un sólido blanco y translúcido. En secciones delgadas es casi del todo transparente. A las temperaturas ordinarias es tenaz y flexible, y tiene una superficie relativamente blanda que puede rayarse con la uña. A medida que aumenta la temperatura, el sólido va haciéndose más blando y finalmente se funde a unos 110 °C, transformándose en un líquido transparente. Si se reduce la temperatura por debajo de la normal, el sólido se hace más duro y más rígido, y se alcanza una temperatura a la cual una muestra no puede doblarse sin romperse.

El movimiento del polietileno líquido es no newtoniano. La velocidad disminuye a medida que aumenta la presión y con ésta la velocidad de paso. Por la sensibilidad de la viscosidad de la masa fundida al peso molecular, y en virtud de

que el polietileno se maneja normalmente en estado fundido en operaciones de extrusión, moldeo o vaciado, los diferentes polímeros del comercio se caracterizan por la viscosidad del producto fundido.

En el intervalo 20000-30000 del peso molecular, un aumento de 10% del peso molecular dobla aproximadamente la viscosidad del producto fundido.

La viscosidad del polietileno fundido disminuye a medida que aumenta la temperatura; se reduce aproximadamente a la mitad por un aumento de 25 °C, en la temperatura. En la tabla 2.2 se observa las propiedades del polietileno líquido a 120 °C.

Tabla 2.2 Propiedades del polietileno líquido ^[2.2]

Densidad a T=120 °C	0,80.
Coefficiente de dilatación cúbica	0,0007 por °C.
Calor específico	0,70 (aprox.)

2.2.3.1. Características del flujo cuando se varía la temperatura

Las características del flujo cuando se varía la temperatura se pueden notar cuando fluye por un orificio, como durante la extrusión o el moldeo, existe una orientación apreciable de las moléculas, que pasan al estado no orientado si el material se mantiene en el estado líquido, pero permanecen orientadas en el sólido si, como es normal en la fabricación, el material fundido se enfría rápidamente. El grado de esta orientación es una función de la longitud media de la cadena y del grado de ramificación. Los polietilenos de alto peso molecular muestran más orientación que los materiales de peso molecular bajo, y la orientación disminuye a medida que sube la temperatura.

A medida que se reduce la temperatura por debajo de las temperaturas ordinarias, se reduce el alargamiento en la ruptura y se alcanza una temperatura en la cual no

se produce estirado en frío, rompiéndose el ejemplar bruscamente con sólo un alargamiento de 10%. Esta temperatura es aproximadamente aquella en que un ejemplar no puede ser doblado más que en un grado muy limitado sin que se rompa como si fuera un material quebradizo.

Una propiedad bastante extraordinaria del polietileno de peso molecular inferior a 20.000 es su sensibilidad al agrietamiento cuando se somete a tensiones en contacto con ciertos líquidos, en especial líquidos orgánicos polares. Los rasgos moleculares que rigen esta propiedad son semejantes a los que regulan la flexibilidad a baja temperatura, y si es necesaria la resistencia a esta forma de ataque, debe usarse polietileno de alto peso molecular.

Todas las propiedades mecánicas del polietileno son sensibles a la historia térmica del ejemplar. Si el material se enfría rápidamente desde el estado fundido, el sólido tiene densidad y cristalinidad menores; por consiguiente es más blando y más flexible y, por lo menos al principio, es más resistente al agrietamiento a bajas temperaturas y al agrietamiento en presencia de líquidos orgánicos. Por otro lado, es probable que contenga más tensiones internas. El enfriamiento lento partiendo del estado fundido o el recocido de la muestra, por ejemplo, por tratamiento en agua hirviendo, da un producto más cristalino, más duro y algo más quebradizo; pero el sólido puede estar sometido a menos tensiones y es menos probable que se produzcan cambios lentos en las dimensiones al elevarse después la temperatura.

2.2.3.2. Solubilidad e hinchazón

A temperaturas inferiores a 60 °C., el polietileno, si se exceptúan las muestras de peso molecular muy bajo, es muy poco soluble en los disolventes, pero a temperaturas más altas es fácilmente soluble en hidrocarburos e hidrocarburos halogenados, aunque sigue siendo muy poco soluble en líquidos más polares, como alcoholes, ácidos, ésteres, aminas, fenoles y nitrocompuestos. La rapidez

con que varía la solubilidad en función de la temperatura es frecuentemente tan grande que da el aspecto de casi una temperatura crítica por debajo de la cual el polímero es insoluble y por encima de la cual es fácilmente soluble. La solubilidad del polietileno depende hasta cierto punto del peso molecular; las variedades más solubles son las de peso molecular más bajo; pero a temperaturas inferiores a 110 °C, tiene también mucha importancia el grado de ramificación de la cadena y, por consiguiente, la capacidad del polímero sólido para cristalizar. De dos polímeros con el mismo peso molecular, pero con diferentes grados de ramificación, el más soluble es el más ramificado.

2.2.3.3. Permeabilidad

Una propiedad importante del polietileno es su pequeña permeabilidad al vapor de agua. Por otro lado, el polietileno tiene una permeabilidad elevada a los vapores orgánicos y al oxígeno. La permeabilidad aumenta con la temperatura.

2.2.3.4. Propiedades eléctricas

Como podía esperarse de su composición química, el polietileno tiene una conductividad eléctrica pequeña, baja permisividad, un factor de potencia bajo (9,15) y una resistencia dieléctrica elevada. Las propiedades eléctricas no son especialmente sensibles a la humedad en virtud de la absorción muy pequeña de agua por el polietileno.

2.2.3.5. Propiedades químicas

El polietileno es uno de los polímeros más estables e inertes, como podía esperarse de su estructura sustancialmente parafínica. Sin embargo, tiene algunas reacciones que limitan sus usos y que exigen adoptar ciertas precauciones durante su tratamiento. En ausencia completa de oxígeno, el polietileno es estable hasta 290 °C. Entre 290 y 350 °C, se descompone y da polímeros de peso

molecular más bajo, que son normalmente termoplásticos o ceras, pero se produce poco etileno. A temperaturas superiores a 350 °C, se producen productos gaseosos en cantidad creciente, pero el producto principal no es el etileno, sino el butileno. En este respecto, el polietileno difiere del poliestireno y del metilacrilato de metilo, que dan el monómero como producto principal de la pirolisis. En presencia de oxígeno, el polietileno es mucho menos estable. Se han observado cambios en las propiedades físicas y químicas que indican oxidación y degradación de las moléculas del polímero a 50 °C, y en presencia de la luz se produce una degradación incluso a las temperaturas ordinarias.

2.2.3.6. Oxidación térmica

La oxidación térmica del polietileno es importante en el estado fundido, porque influye sobre el comportamiento en los procesos de tratamiento, y en el estado sólido porque fija límites a ciertos usos. Los principales efectos de la oxidación del polietileno son variaciones en el peso molecular que se manifiestan primero por cambios en la viscosidad y, cuando son más intensos, por deterioro en la resistencia mecánica, variación en las propiedades eléctricas (especialmente aumento en el factor de potencia), desarrollo de olor rancio y cambio de color al amarillo, pardo y, en casos extremos, al negro. Una oxidación intensa, especialmente a temperaturas elevadas, conduce a la degradación de la cadena y a la pérdida de productos volátiles: monóxido de carbono, agua y ácidos grasos, el producto se hace quebradizo y parecido a la cera. El proceso de la oxidación es auto catalítico; aumenta la rapidez de la oxidación a medida que aumenta la cantidad de oxígeno absorbido. La velocidad de oxidación varía de una muestra a otra y es mayor cuando la ramificación de cadena es grande y también si el contenido inicial de grupos que contienen oxígeno es grande. La oxidación térmica del polietileno “puede reducirse o suprimirse durante algún tiempo incorporándole antioxidantes” en general, éstos son los mismos tipos que se usan para el caucho, y muchos son fenoles o aminas. Al elegir el antioxidante, se prestará atención a

puntos como la ausencia de color y olor y a la baja volatilidad para evitar pérdidas durante el tratamiento a temperaturas altas.

2.2.3.7. Oxidación fotocatalizada

La oxidación fotocatalizada del polietileno expuesto a la luz del Sol es un problema más grave, ya que la protección no se consigue con tanta facilidad como en el caso de la oxidación térmica. Los antioxidantes normales son de poca utilidad y la protección más satisfactoria se obtiene incorporando aproximadamente 2% de negro de humo, bien dispersado en el polímero. Se tiene también aquí una reacción auto catalítica, como en el caso de la oxidación térmica. La foto oxidación produce coloración, deterioro en las propiedades físicas y pérdida de resistencia mecánica, que conduce al agrietamiento y ruptura de las muestras sometidas a tensión. Conviene insistir en que el polietileno no protegido no sirve para usos en los cuales estará expuesto a la luz solar.

Tabla 2.3 Oxidación del polietileno ^[2.3]

Tipo	Efectos	Protección
Térmica	Variaciones del P.M	Incorporación de antioxidantes
	Variación de las propiedades eléctricas	
	Desarrollo de olor rancio	
	Cambio de color	
	Degradación de la cadena	
Foto catalizada	Coloración	Incorporación negro de humo al 2%
	Deterioro en las propiedades físicas	
	Perdida de resistencia mecánica (grietas)	

2.2.3.8. Efectos producidos por variaciones en la densidad

Los polietilenos más densos son lógicamente más pesados, pero aún los artículos fabricados con los polietilenos de alta densidad flotarán en agua. Esta es una ventaja para el moldeador pues le permitirá obtener más volumen por cada kilogramo de polietileno que usando cualquier otro plástico.

2.2.3.9. Efectos producidos por la variación del peso molecular promedio

Cada resina de polietileno consiste en una mezcla de cadenas cortas y largas, esto es moléculas de alto y bajo peso molecular. El promedio de estos pesos moleculares es la segunda propiedad molecular básica. Dentro de ciertas limitaciones el peso molecular “promedio es inversamente proporcional al índice de fusión”, es decir si el peso molecular promedio aumenta, el índice de fusión disminuye y viceversa.

2.2.3.10. Índice de fusión

El índice de fusión describe la fluencia de una resina de polietileno a una determinada temperatura (190 °C) y a una determinada presión. Si el índice de fusión de una resina es bajo, su viscosidad es elevada y viceversa, siendo viscosidad de fusión la resistencia de la resina fundida a fluir durante la formación de película, tubería o recipientes. Por lo tanto, las resinas de mayor índice de fusión fluyen más fácilmente en el estado de fusión que aquellas con menor índice. La fluencia del polietileno fundido es afectada por condiciones de procesamiento tales como presión, temperatura, y estas condiciones pueden variar extensamente. El índice de fusión debe ser utilizado juntamente con otras normas para describir la fluencia y otras propiedades de las resinas. En lugar del índice de fusión, los moldeadores por inyección se refieren a resinas de PE de mediana, alta

o muy alta fluencia. Los moldeadores por extrusión se referirán a polímeros de baja, mediana o alta velocidad de extrusión.

Generalmente las resinas de polietileno más indicadas para aplicaciones tales como extrusión de película, y soplado de botellas deben tener un peso molecular promedio un tanto mayor que aquellas resinas indicadas para otras aplicaciones, tales como moldeo por inyección. Pero de una manera más detallada se puede tener las siguientes características:

- Con un incremento en la densidad se mejoran propiedades tan importantes como el punto de ablandamiento, impermeabilidad a gases y líquidos, claridad de la película (transparencia y ausencia de opacidad) y brillo, pero con perjuicio de la flexibilidad y tenacidad.
- Un aumento en el peso molecular promedio puede hacer a la resina más apropiada para usos en que se requiera mayor tenacidad. Un artículo fabricado con una resina de polietileno de mayor peso molecular promedio, tendrá mayor resistencia al cuarteo bajo tensión ambiental, o sea a cuartearse cuando es sometido a esfuerzos en presencia de líquidos tales como detergentes, aceites o solventes. Dado que la viscosidad (la propiedad de fluir más lentamente en estado de fusión) aumenta con el peso molecular, las resinas de PE de más alto peso molecular son más difíciles de extruir y, por lo tanto, requieren temperaturas más elevadas. Por otra parte, las resinas de PE de menor peso molecular se utilizan para aplicaciones tales como moldeo por inyección a menores temperaturas y ciclos más cortos.
- Las resinas de PE tienen una estrecha distribución del peso molecular son particularmente resistentes al cuarteo bajo tensión ambiental y a la fragilidad a bajas temperaturas.

2.3. PROCESO DE EXTRUSIÓN

Se puede definir como el proceso de obtención de longitudes prácticamente ilimitadas con una sección transversal constante conformando el material al obligarlo a pasar a través de una boquilla con una geometría determinada y bajo condiciones controladas. El proceso de extrusión se ha desarrollado fundamentalmente para la conformación de termoplásticos, aunque también se extruyen termoestables. La Fig. 2.4 muestra las partes que conforman una extrusora de tornillo simple.

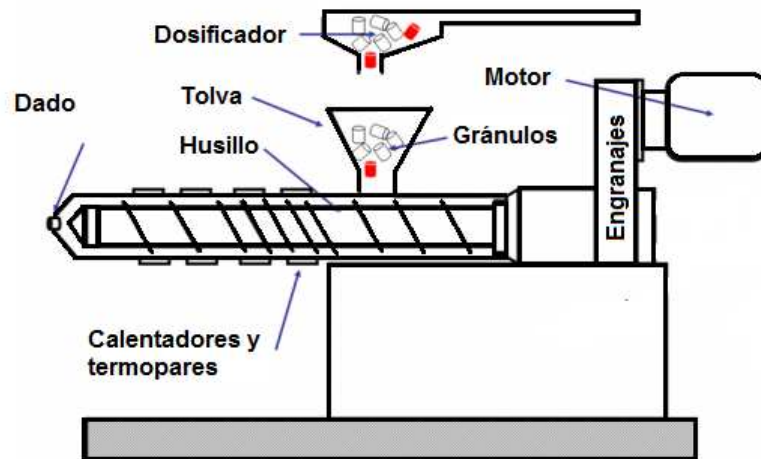


Figura 2.4 Diseño genérico de un extrusor ^[2.4]

La extrusión de polímeros es un proceso industrial, basado en el mismo principio de la extrusión general, sin embargo la ingeniería de polímeros ha desarrollado parámetros específicos para el plástico, de manera que se estudia este proceso aparte de la extrusión de metales u otros materiales.

En la extrusión de polímeros, las materias primas en forma de partículas, gránulos o polvo termoplástico se colocan en una tolva y se alimentan al barril o cañón del extrusor. Este barril contiene un tornillo que mezcla las partículas y las transporta por el barril. La fricción interna debida a la acción mecánica del tornillo, junto con

los calentadores que rodean al barril del extrusor, hacen calentar las pastillas y las licúan. Además, la acción del tornillo hace aumentar la presión en el barril.

Este proceso implica dos operaciones: el de transporte del material hacia la boquilla y el de conformado al pasar a través de ésta. Las máquinas empleadas mayoritariamente para esta función son las extrusoras de un solo tornillo. Consisten fundamentalmente en un cilindro, que forma el cuerpo principal de la máquina, en cuyo interior va alojado un tornillo. Dicho tornillo es el encargado de transportar el material plástico desde la tolva de alimentación hasta la boquilla, a una velocidad uniforme y homogénea, motivada por el giro del mismo.

La plastificación o ablandamiento del material plástico es debido a un doble efecto: por un lado, al trabajo mecánico motivado por rozamiento contra el tornillo y contra las paredes del cilindro; y por otro, al calor suministrado a través de las paredes del cilindro por los elementos de calefacción externos

2.3.1. ZONAS EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Existen 3 zonas que son de alimentación, compresión y dosificación como muestra la Fig. 2.5.

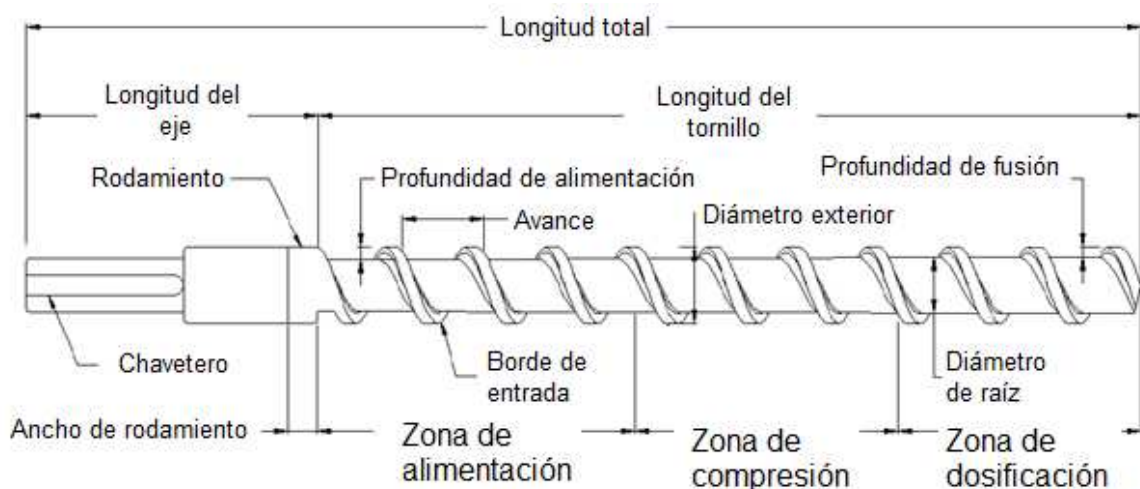


Figura 2.5 Zonas en el proceso de extrusión

2.3.1.1. Zona de alimentación

Zona en la cual se precalienta y transporta el polímero a las partes siguientes. La profundidad del tornillo es constante y la longitud de esta zona es tal que hay una alimentación correcta hacia delante, ni deficiente ni excesiva.

2.3.1.2. Zona de compresión

Esta zona tiene una profundidad de canal decreciente. Primeramente, se expulsa el aire atrapado entre los gránulos originales; en segundo lugar, se mejora la transferencia de calor desde las paredes del barril calentando conforme el material se vuelve menos espeso; en tercer lugar, se da el cambio de densidad que ocurre durante la fusión. Hay una modificación del diseño ideal para cada tipo de polímero:

- Para un polímero que funde poco a poco, por ejemplo, el polietileno de baja densidad, es apropiado un tornillo con la longitud total dividida en 3 zonas iguales.
- Si el polímero funde en forma abrupta (ejemplo el nylon y el polipropileno), el criterio general es que se requiere una zona de compresión muy corta, por lo común, de una longitud de solo una vuelta de la espiral.
- El cloruro de polivinilo es un polímero difícil de extruir, ya que funde muy lentamente. Realmente es un caucho termoplástico y tiene inusuales propiedades a la fricción; con frecuencia, se procesa mejor utilizando un tornillo que tenga una larga zona de compresión en toda su longitud.

2.3.1.3. Zona de dosificación

Se encuentra una profundidad de tornillo constante. Su función es la homogenizar el material fundido y con ello suministrar a la región del dado material de calidad homogénea a temperatura y presión constante.

2.3.2. LA ZONA DEL DADO

La zona final de un extrusor es la zona del dado, que termina en el propio dado. Situado en esta región se halla la porta mallas. Esta consta, por lo común, de una placa de acero perforada conocida como la placa rompedora y un juego de mallas de dos o tres capas de gasa de alambre situadas en el lado del tornillo.

El ensamble placa rompedora – juego de mallas tiene 3 funciones:

- Evitar el paso de material extraño, por ejemplo, polímero no fundido, polvos, cuerpos extraños.
- Crear un frente de presión cuando se opone una resistencia al bombeo de la zona anterior
- Eliminar la “memoria de giro” del material fundido. En muchos casos el polímero “recuerda” su trayecto en giros a lo largo de la espiral del tornillo, aun después de haber pasado por el dado y esto puede dar como resultado una deformación por torsión del producto.

2.3.3. MECANISMOS DE FLUJO

2.3.3.1. Fusión

Conforme se transporta el polímero a lo largo del tornillo se funde una delgada película en la pared del barril. Esto se efectúa por lo común gracias al calor que se conduce desde los calentadores del barril, pero puede deberse a la fricción. El tornillo desprende la película fundida al girar. El polímero fundido se mueve desde la cara frontal del hilo hacia el núcleo y luego barre de nuevo para establecer un movimiento rotatorio frente del borde de conducción del hilo. Mientras, se barren otros gránulos o partes solidas de la masa compactada del polímero hacia el “charco fundido” en formación como muestra la Fig. 2.6. El proceso continua lentamente hasta que se funde todo el polímero.

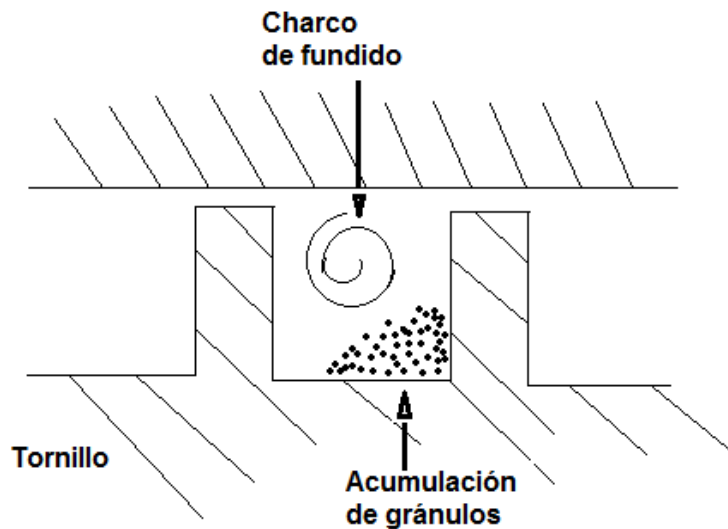


Figura 2.6 Esquema del charco fundido [2.6]

2.3.3.2. Transporte

Hay fricción tanto con el tornillo como con el barril, y esto conduce al mecanismo de transporte principal, el *flujo de arrastre*. Este es literalmente el arrastre del material fundido a lo largo del tornillo como resultado de las fuerzas de fricción, y es el equivalente al arrastre viscoso entre las placas estacionaria y móvil separadas por un medio viscoso. Se le opone la componente del *flujo de presión* producido por el gradiente de presión que hay a lo largo del extrusor. Hay presión alta en el extremo del dado y baja en el extremo de alimentación. Es importante comprender que no hay flujo real resultante debido a la presión, únicamente es una oposición. Hay un espacio finito entre el tornillo y el barril a través del cual se puede fugar el material. Este es también un flujo impulsado por presión y se denomina *flujo de fuga*.

$$\text{Flujo total} = \text{Flujo de arrastre} - \text{Flujo de presión} - \text{Flujo de fuga}$$

2.3.4. ANÁLISIS DE FLUJO

2.3.4.1. Flujo de arrastre

El principal mecanismo de transporte es el flujo por arrastre, que resulta de la fricción entre el líquido viscoso y las dos superficies opuestas que se mueven una con respecto a la otra; el cilindro estacionario y el canal del tornillo giratorio. Donde la ecuación que describe el fenómeno es la siguiente:

$$Qd = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N \sin \phi \cos \phi H \quad (2.1)$$

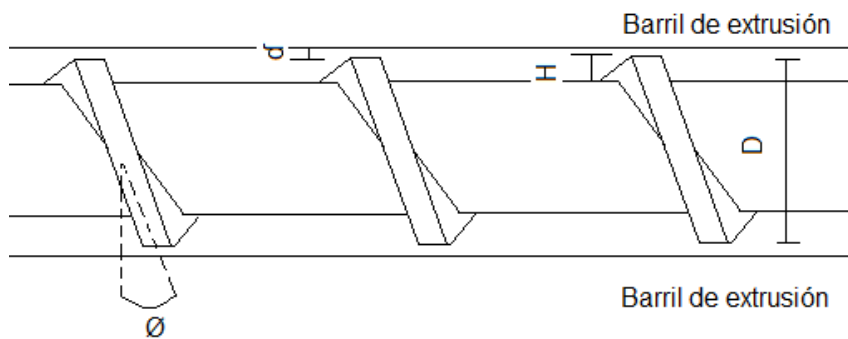


Figura 2.7 Esquema de características del tornillo ^[2.7]

Donde:

D: Diámetro del tornillo

N: Velocidad del tornillo

H: Profundidad del canal

Ø: Ángulo de hélice

El flujo de arrastre depende fundamentalmente, el volumen del canal por rapidez, con un factor de corrección debido al ángulo de hélice.

2.3.4.2. Flujo de presión

Al comprimir al polímero fundido a través de la corriente hacia adelante, el dado crea una contrapresión en el cilindro que reduce el transporte del material por arrastre. Este flujo a contrapresión se puede resumir en la siguiente ecuación:

$$Q_p = \frac{\pi D H^3 \sin^2 \phi}{12n} \left(\frac{dP}{dl} \right) \quad (2.2)$$

El flujo de presión depende de:

- Las dimensiones del tornillo, al depender de la tercera potencia de la profundidad del canal
- El gradiente de presión
- La viscosidad del fluido

2.3.4.3. Flujo de fuga

El flujo de fuga es pequeño en comparación con el flujo de arrastre y el flujo de presión y puede ignorarse al calcular el flujo total. Únicamente tiene significado práctico en máquinas desgastadas en las cuales se vuelve el espacio libre que hay entre el tornillo y el barril.

2.3.4.4. Flujo total

El flujo total está determinado por la resta del flujo de arrastre y el flujo de presión que está representado por las líneas de la Figura 2.8 que muestran que el flujo de arrastre debe ser lo suficientemente grande para vencer las líneas de flujo de presión y está determinado por la siguiente expresión:

$$Q = F\pi^2 D^2 NH \sin\phi \cos\phi - \frac{\pi DH^3 \sin^2\phi P}{12nl} \quad (2.3)$$

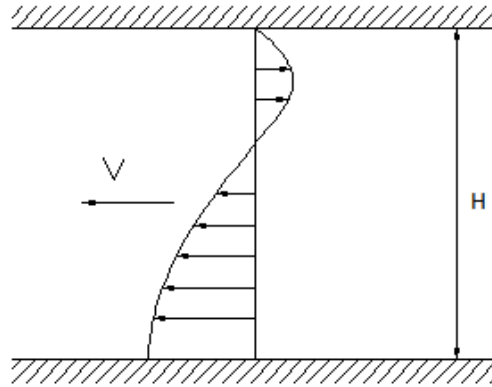


Figura 2.8 Esquema de flujo total [2.8]

2.3.5. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DEL POLÍMERO

La expresión anterior para la salida de un extrusor es obviamente una simplificación. Los dos factores importantes que faltan son

- Las propiedades reológicas (deformación y el flujo de la materia) para los fluidos no newtonianos de la mayoría de los polímeros fundidos.
- Sus propiedades de fricción.

Como se vio, el material no avanza a menos que existan fuerzas de fricción. La importancia del arrastre debido a la fricción en la pared del barril puede valorarse al comparar con el apriete de un tornillo con una tuerca. La tuerca debe mantenerse ajustada o el tornillo quedara flojo. De la misma manera, el arrastre por fricción evita que el material fundido gire simplemente junto con el tornillo. Sin embargo, a diferencia de la tuerca que sujeta firmemente, la fuerza de fricción es variable, depende del tipo de polímero y de las condiciones. Cuanta más fricción haya, menor será la tendencia a girar con el tornillo, de aquí la creación de tornillos más largos. Estos tornillos tienen mayor área de superficie del barril y generan una mayor fuerza de fricción total.

Se va a considerar más detalladamente la expresión general para el flujo de arrastre. Esta se basó en cierto número de suposiciones que la simplificaron:

- El material fundido se comporta como un fluido newtoniano
- Por lo tanto, la viscosidad es la misma en todos los puntos.
- Existe un gradiente de velocidad que va desde cero en el tornillo hasta un valor máximo en la pared del barril.

Estas suposiciones, conducen al factor $\frac{1}{2}$ de la ecuación de flujo de arrastre. Pero ahora se sabe que estos materiales son fluidos no newtonianos; además, la velocidad no puede ser cero en el tornillo ya que significaría la presencia de una capa estancada que se degradaría. El material debe deslizarse sobre las superficies y las características de deslizamiento se representan mediante los coeficientes principales de fricción. Estos varían en un amplio intervalo para diferentes polímeros; además dependen mucho de la temperatura. La magnitud de esta variación se indica con unos valores ilustrativos en la siguiente tabla:

Tabla 2.4 Coeficientes de fricción de varios polímeros ^[2.4]

Polímero	Coefficiente de fricción (λ)
Poli tetrafluoretileno (PTFE)	0.04 – 0.15
Polietileno de baja densidad (LDPE)	0.30 – 0.80
Polietileno de alta densidad (HDPE)	0.08 – 0.20
Polipropileno (PP)	0.67
Poliestireno (PS)	0.33 – 0.50
Polimetilmetacrilato (PMMA)	0.25 – 0.50
Nylon	0.15 – 0.40
Policloruro de Vinilo (PVC)	0.20 – 0.90
Caucho (SBR)	0.50 – 3.0
Caucho Natural (NR)	0.50 – 3.0

La condición de flujo de arrastre se representa mejor si se reemplaza el factor $\frac{1}{2}$ por uno más general, F , el cual incluye los comportamientos friccional y viscoso del polímero.

$$Qd = F\pi^2 D^2 N \text{sen } \phi \cos \phi H \quad (2.4)$$

Bajo condiciones ideales, $F = \frac{1}{2}$, pero con baja fricción del barril, la alta fricción del tornillo y baja viscosidad aparente, $F \rightarrow 0$ y el flujo de arrastre tienden hacia cero. Bajo estas condiciones, el manejo eficiente del extrusor se hace muy difícil; la ecuación del flujo de arrastre indica que se necesita un tornillo de diámetro grande (D mayor) rotando a alta velocidad (N alta) para maximizar la salida, pero esto tiende a incrementar la velocidad de corte lo cual disminuye la viscosidad incluso después y, por lo tanto disminuye F .

$$\gamma = \frac{\pi DN}{H} \quad (2.5)$$

Un problema posterior es que el coeficiente de fricción depende de la temperatura, que es diferente para cada material y es un aspecto importante para facilitar el manejo de un extrusor. Por ejemplo, para el polietileno de baja densidad, λ a $100^\circ\text{C} \approx 1$, y a $250^\circ\text{C} \approx 0.055$. En consecuencia, se desliza bien contra la pared caliente del barril. La fricción disminuye con la temperatura, al proporcionar una autorregulación del calor que se genera debido a la fricción. Este material se manufactura fácilmente en extrusor de tornillo simple.

Este comportamiento contrasta con el del cloruro de polivinilo no plastificado, que tiene el opuesto. Para el cloruro de polivinilo, λ a $100^\circ\text{C} \approx 0.06$, y a $150^\circ\text{C} \approx 1$. Ahora la fricción necesaria para mantener la producción se excede fácilmente; al elevarse la temperatura para obtener un material con fundido óptimo, aumenta la respuesta a la fricción y se produce sobrecalentamiento debido al calor generado por esta y entonces se degrada fácilmente. El cloruro de polivinilo es un polímero

de notable inestabilidad térmica, requiere sistemas de estabilización térmica bastante complejos como aditivos bajo buenas condiciones de manufactura. Por lo tanto es un polímero difícil de trabajar en un extrusor de tornillo simple y se somete a extrusión con mayor frecuencia en maquinas de tornillos gemelos.

2.3.6. EL DADO DE EXTRUSIÓN

El dado en el proceso de extrusión es análogo al molde en el proceso de moldeo por inyección, a través del dado fluye el polímero fuera del cañón de extrusión y gracias a éste toma el perfil deseado. El dado se considera como un consumidor de presión, ya que al terminar el husillo la presión es máxima, mientras que a la salida del dado la presión es igual a la presión atmosférica. La presión alta que experimenta el polímero antes del dado, ayuda a que el proceso sea estable y continuo, sin embargo, el complejo diseño de los dados es responsable de esta estabilidad en su mayor parte.

El perfil del dado suele ser diferente del perfil deseado en el producto final, esto debido a la memoria que presentan los polímeros, esfuerzos residuales y orientación del flujo resultado del arrastre por el husillo. Existen dados para tubos, para láminas y perfiles de complicadas geometrías, cada uno tiene características de diseño especiales que le permite al polímero adquirir su forma final evitando los esfuerzos residuales en la medida de lo posible.

Los dados para extruir polímeros consideran la principal diferencia entre materiales compuestos por macromoléculas y los de moléculas pequeñas, como metales. Los metales permiten ser procesados con esquinas y ángulos estrechos, en cambio los polímeros tienden a formar fillos menos agudos debido a sus características moleculares, por ello es más eficiente el diseño de una geometría final con ángulos suaves o formas parabólicas e hiperbólicas.

2.3.6.1. Características del extrusor y de la matriz

El producto de extrusión se obtiene al obligar al material fundido a que pase a través de un dado con una cierta forma y generar una pieza extruida, perfilada y continua. La interacción del extrusor y su dado pueden comprenderse observando sus respectivas “características”. Estos conceptos se formulan como sigue:

- Si la presión no se acumulara, por ejemplo, que no hubiera placa rompedora o dado, la producción sería máxima, Q_{max} . Se puede utilizar la ecuación ideal para el flujo de arrastre:

$$Q = Q_{max} = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin(\phi) \cos(\phi) \quad (2.6)$$

- Si la resistencia es máxima (taponamiento), $Q=0$ como muestra la Figura 2.9, se puede igualar el flujo de arrastre con el flujo de presión.

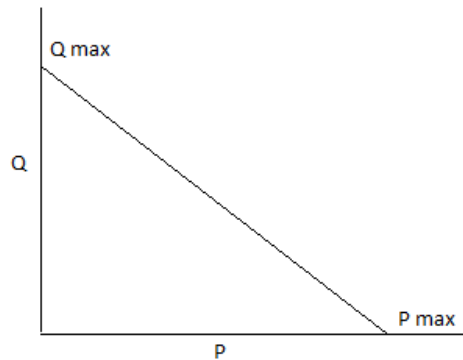


Figura 2.9 Línea característica del extrusor de tornillo [2.9]

$$P = P_{max}$$

Esto es,

$$\frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin(\phi) \cos(\phi) = \frac{\pi D H^3 \sin^2(\phi) P}{12 \eta L} \quad (2.7)$$

$$P_{max} = \frac{6 \pi D L N \eta}{H^2 \tan(\phi)} \quad (2.8)$$

- Se requiere una presión para que trabaje el dado que se encuentra en el extremo de salida del extrusor, es necesaria la presión simplemente para forzar el paso del material fundido a través del dado. La característica del dado es, por lo tanto, opuesta en forma; la producción máxima se deberá a una presión máxima. El punto de intersección es el punto de operación, donde se hallan las condiciones óptimas de funcionamiento del extrusor como muestra la Figura 2.10.

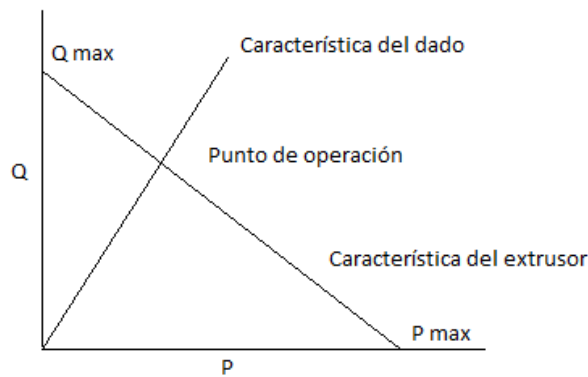


Figura 2.10 Interacción de líneas características del tornillo y del dado [2.10]

- La salida de dados individuales depende, obviamente, de sus formas. En general:

$$Q = \frac{KP}{\eta} \quad (2.9)$$

En donde K es el factor que depende de la forma.

Tabla 2.5 K para cilindros y rectángulos [2.5]

K para cilindros		K para rectángulos	
$K = \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot La}$	R = radio La = longitud	$K = \frac{W \cdot a^3}{12 \cdot La}$	W = ancho a = altura La = longitud

- Las posiciones de las líneas de la grafica se modifican por cambios en las condiciones de operación. Si N, la velocidad del extrusor, aumenta, se desplaza hacia arriba la línea característica del extrusor. Si cambian las dimensiones del dado, por ejemplo el radio R del cilindro se hace mayor, aumenta la pendiente de la línea característica del dado.

La ecuación de la producción para el extrusor es, como se vio,

$$Q = \alpha N - \left(\frac{\beta P}{\eta} \right) \quad (2.10)$$

α y β/η son constantes para el sistema total, incluyendo el polímero. Por tanto, la ecuación es la de una línea recta con pendiente negativa. La Figura 2.11 muestra una familia de líneas características de extrusor o de tornillos paralelos para diferentes velocidades de tornillo, N.

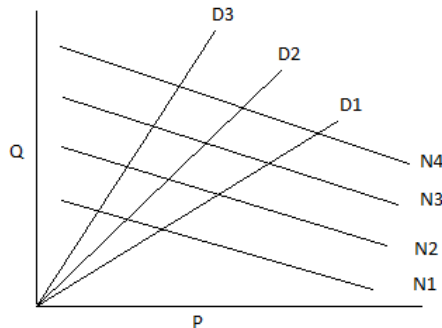


Figura 2.11 Familia de líneas características de tornillo con diversas interacciones de dado [2.11]

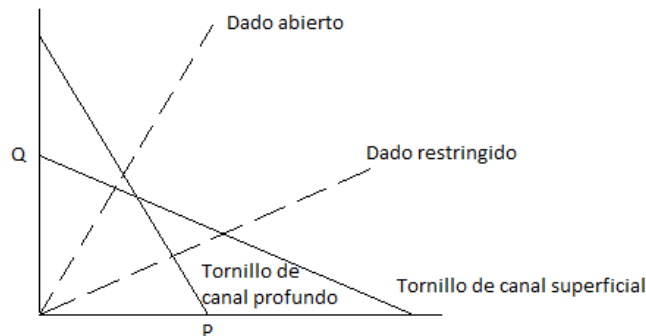


Figura 2.12 Diferentes acoplamientos de líneas características de tornillo y dado [2.12]

Los puntos de intersección de la Figura 2.12 muestran que al usar un dado abierto, se obtendrían los mejores resultados con un tornillo de canal profundo, mientras que si se utiliza un dado restringido, lo mejor sería un canal de poca profundidad. Las líneas características del dado tienen curvatura. Este incremento en la producción significa un incremento en la rapidez cortante y, por tanto, una disminución en la viscosidad aparente.

2.3.6.2. Expresión para el cálculo del flujo total cuando no se conoce la presión dentro del cilindro

Partiendo de la expresión (2.3):

$$Q = F\pi^2 D^2 NH \sin\phi \cos\phi - \frac{\pi DH^3 \sin^2\phi P}{12nL}$$

Existen husillos para ciertos usos particulares en los cuales, las dimensiones del canal helicoidal varían con la longitud. En estos, el ángulo de hélice y la profundidad del canal deberán expresarse como función de la longitud. Reemplazando Φ y H como una función de H en la ecuación de flujo total se tiene:

$$Q = \alpha \cdot H(L) \cdot \sin\phi(L) \cdot \cos\phi(L) - \left[\frac{\beta}{\mu} \cdot H^3(L) \cdot \sin^2\phi(L) \right] \cdot \frac{dP}{dL} \quad (2.11)$$

Donde:

$$\alpha = F \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N$$

$$\beta = \frac{\pi \cdot D}{12}$$

En diversas aplicaciones se suele emplear husillos con una sola zona de compresión creciente como muestra la Figura 2.13; al comienzo de la cual se efectúa la compresión y al final la extrusión del material plastificado homogéneo.

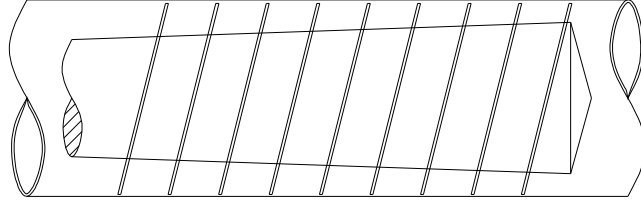


Figura 2.13 Husillo con una zona de compresión creciente

El tornillo de la figura es de una sola etapa, con paso constante y profundidad de canal variable, por lo tanto la función $\Phi(L)$ es constante, y la función $H(L)$ debe ser considerada. Puesto que el flujo real Q es constante a lo largo del husillo, el incremento de presión en toda la longitud de la zona dosificadora del husillo (L) se obtiene integrando la ecuación, entonces:

$$\Delta P = \int_0^L dP = \int_0^L \left\{ \frac{[\alpha \cdot H(L) \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \phi - Q_T] \cdot \eta}{\beta \cdot H^3(L) \cdot \text{sen}^2 \phi} \right\} \cdot dL \quad (2.12)$$

Despejando ΔP :

$$\frac{Q_T \cdot \eta}{K} = \int_0^L \left\{ \frac{[\alpha \cdot H(L) \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \phi - Q_T] \cdot \eta}{\beta \cdot H^3(L) \cdot \text{sen}^2 \phi} \right\} dL \quad (2.13)$$

Despejando Q_T de la última ecuación:

$$\begin{aligned} \frac{Q_T}{K} &= \int_0^L \frac{\alpha \cdot \cos \phi}{\beta \cdot H^2(L) \cdot \text{sen} \phi} \cdot dL - \int_0^L \frac{Q_T}{\beta \cdot H^3(L) \cdot \text{sen}^2 \phi} \cdot dL \\ \frac{Q_T}{K} &= \int_0^L \frac{\alpha \cdot \text{ctg} \phi}{\beta \cdot H^2(L)} \cdot dL - \int_0^L \frac{Q_T \cdot \text{csc}^2 \phi}{\beta \cdot H^3(L)} \cdot dL \\ \frac{Q_T}{K} + \frac{Q_T}{\beta} \cdot \int_0^L \frac{\text{csc}^2 \phi}{H^3(L)} \cdot dL &= \frac{\alpha}{\beta} \cdot \int_0^L \frac{\text{ctg} \phi}{H^2(L)} \cdot dL \end{aligned}$$

$$Q_T \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{\beta} \cdot \int_0^L \frac{\csc^2 \phi}{H^3(L)} \cdot dL \right) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \int_0^L \frac{\text{ctg} \phi}{H^2(L)} \cdot dL$$

$$Q_T = \frac{\frac{\alpha}{\beta} \cdot \int_0^L \frac{\text{ctg} \phi}{H^2(L)} \cdot dL}{\frac{1}{K} + \frac{1}{\beta} \cdot \int_0^L \frac{\csc^2 \phi}{H^3(L)} \cdot dL} \quad (2.14)$$

Donde Q_T es:

$$Q_T = \frac{\alpha \cdot \int_0^L \frac{\text{ctg} \phi}{H^2(L)} \cdot dL}{\frac{\beta}{K} + \int_0^L \frac{\csc^2 \phi}{H^3(L)} \cdot dL} \quad (2.15)$$

2.3.6.3. Ejemplo de cálculo

Para el ejemplo de cálculo se tiene un tornillo para polietileno dividido en 3 zonas iguales ya que es un polímero que funde poco a poco. En la Figura 2.14 Muestra las dimensiones necesarias del tornillo para el cálculo:

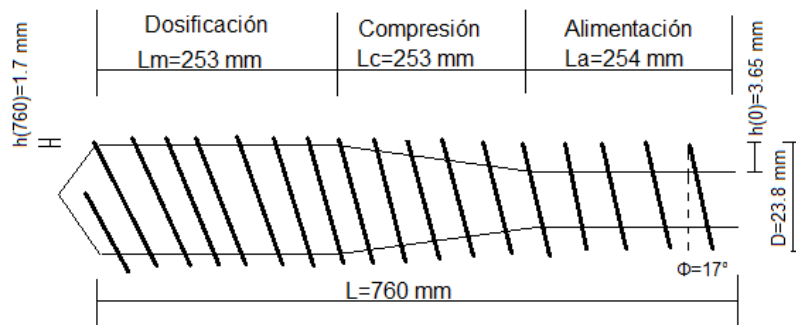


Figura 2.14 Tornillo para polietileno

Una vez conocidas las dimensiones del tornillo se procede a calcular la función que representa la profundidad de canal variable (h).

$$h(L) := -0.0025658 \cdot L + 3.65$$

$$S \quad h(L) = 3.65 \text{ mm}$$

$$L := 760 \quad h(L) = 1.7 \text{ mm}$$

Para condiciones de funcionamiento de 60 Hz, se tiene que calcular la velocidad de giro del husillo en rad/s producidas a esta frecuencia:

$$N := 60 \cdot \frac{\pi}{60 \cdot 180} \quad N = 0.017 \cdot \frac{r}{a_s \cdot d}$$

Se debe conocer también la constante de la boquilla, que para el ejemplo vamos a suponer que no existe placa rompedora y que la boquilla es para obtener un perfil circular:

$$Ra := 2.5 \text{ mm} \quad \text{Radio de la abertura}$$

$$La := 10 \text{ mm} \quad \text{Largo de la abertura}$$

$$K := \frac{\pi \cdot Ra^4}{8 \cdot La}$$

$$K = 1.534 \text{ mm}^3$$

Se obtiene las variables α y β para simplificar un poco la formula:

$$\alpha := \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N \quad \alpha = 62.788$$

$$\beta := \frac{\pi \cdot D}{12} \quad \beta = 7.069$$

Una vez obtenido todas las variables se utiliza la formula (2.8) y se obtiene el siguiente caudal teórico:

$$Q := \frac{\alpha \int_{507}^{770} \frac{c \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right)}{t h (L)^2} dL}{\frac{\beta}{K} + \int_{507}^{770} \frac{c \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right)^2}{c h (L)^3} dL}$$

$$Q = 33.932 \frac{m^3}{m_s}$$

2.4. MATERIALES COMPUESTOS A BASE DE PLÁSTICOS MÁS FIBRAS

Hoy en día, la tecnología permite una mayor recuperación de desperdicios plásticos y de fibras naturales, realizando los debidos procesos, se puede lograr la interacción y combinación de estos con el fin de modificar tanto su composición mecánica como química, estos productos además tendrán el aliciente no sólo de producciones de alto valor agregado, sino del beneficio ambiental, que genera la recuperación y reutilización de estos materiales.

Estos productos no pueden convertirse en materiales puros y, por tanto, no es posible separarlos para reciclarlos en corrientes independientes. La recuperación se realiza fabricando productos diferentes de los que provienen, pero generalmente de larga duración, en la actualidad con el fin de preservar el medio ambiente se están realizando estudios de cómo combinar el plástico reciclado, con fibras naturales, obteniendo resultados, tales como tablonés de pisos, tableros para diferentes usos, postes, estibas, cajas contenedoras, canaletas y hasta adoquines para pisos. Además de ser productos de larga duración, también representan un modo eficiente de recuperación de los desperdicios plásticos.

Podemos señalar, que con el fin de reducir el impacto ambiental generado por distintos desperdicios, tanto, plásticos como fibras, día a día se busca encontrar la manera de reutilizar estos desperdicios, y es por estos esfuerzos y estudios, que en la actualidad ya se producen productos en base de plástico reciclado y fibras naturales, entre las principales combinaciones tenemos:

2.4.1. PRODUCTOS REALIZADOS A BASE DE PLÁSTICO Y ASERRÍN

En lo que tiene que ver a la aplicación de esta mezcla, en la actualidad existe un proyecto que viene del deseo por encontrar nuevos usos y propósitos para las bolsas de plástico y el aserrín, en el cual están creando nuevas cualidades estéticas y aplicaciones para los dos materiales. Aquí se han unido el aserrín de plástico con el aserrín de madera, creando una mezcla homogénea para crear un nuevo producto sin el uso de adhesivos. El proceso de fabricación incluye la creación de una mezcla de partes iguales de plástico y aserrín de madera, presionándolo en un molde de aluminio y horneándolo, el calor permite que el plástico forme una resina / pegamento que mantiene los materiales juntos, el resultado es una estructura firme, que da al aserrín y a las bolsas de plástico mundanas una nueva estética material, dándoles así una nueva reutilización.



Figura 2.15 Productos de plástico y aserrín [2.15]

2.4.2. PRODUCTOS REALIZADOS A BASE DE PLÁSTICO Y FIBRA DE VIDRIO

La tecnología de punta ya permite agregar valor de manera dramática a cientos de miles de toneladas de desperdicios de plásticos mezclados en Estados Unidos, por año. Una tendencia muy importante ha sido la de agregar fibra de vidrio a estos desperdicios para mejorar su desempeño mecánico. La empresa Composite Technologies Corp., CTC, fábrica tableros por medio de un proceso propietario de extrusión y moldeado por compresión. Esta corporación consume no menos de 5.500 toneladas anuales de desperdicios plásticos para fabricar tableros para canchas de baloncesto, reforzados con 15% de fibra de vidrio.

La empresa Coca Cola y el fabricante de muebles Emeco han combinado sus productos emblemáticos - el contorno de la botella Coca-Cola y la famosa silla Navy, para crear una nueva silla a partir de al menos 111 botellas de plástico recicladas. El contenido de PET en cada silla proviene de la mayor planta mundial de reciclaje de botellas de plástico que comenzó a funcionar en 2009 en Spartanburg, Carolina del Sur en los Estados Unidos a través de una alianza entre la empresa Coca-Cola y la empresa United Resoure Recovery.



Figura 2.16 Producto de plástico y fibra de vidrio [2.16]

2.4.3. PRODUCTOS REALIZADOS A BASE DE PLÁSTICO MÁS FIBRAS NATURALES

Friul Filiere fabrica un material compuesto ultraligero con aspecto de madera para fabricar perfiles, el cual es una mezcla de materia termoplástico atóxica de fibras naturales, que pueden ser aserrines (en una proporción de 30 o 50% con una granulometría y una humedad determinada), mezcladas adecuadamente con un PVC y un agente de expansión, lubricante y estabilizantes.

Con este material, que pueden transformarse en extrusoras mono husillo de determinado tipo o en extrusoras de doble husillo, paralelas o cónicas, se obtiene un producto de densidad de 0,65, muy similar a la madera, pero con un coste inferior. Además implica un proceso sencillo y una reducción del coste del producto final, manteniendo al mismo tiempo una alta productividad.



Figura 2.17 Producto de plástico y fibras naturales ^[2.17]

El FCC trabaja como madera, es decir, se puede taladrar, fresar, atornillar, clavar, pintar, lacar e incluso recubrir de laminas de melanina. En cuanto a las propiedades físico-químicas, destaca su estabilidad dimensional, su resistencia a la humedad, su capacidad de aislamiento térmico y acústico, así como el modulo de elasticidad que permite su uso en superficies curvas; otra característica es su auto-extinguibilidad.

2.5. MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN DE MOLDES PARA EXTRUIR PLÁSTICO

Los moldes para extrusión de plásticos deben ser maquinados en aceros que cumplan con características técnicas específicas, principalmente: alta resistencia al desgaste, elevado límite de fluencia y fácil maquinabilidad, a nivel internacional cada vez es más común el reciclaje de los plásticos por medio de procesos tales como la extrusión, por esta necesidad y este mercado creciente es que se han creado aceros específicos, que cumplan con las exigencias requeridas por el fabricante. Según catalogo de UDDEHOLM, los aceros recomendados para la maquinación de moldes, para extruir plástico son.

2.5.1. IMPAX SUPREME

Uddeholm Impax Supreme es un acero des gasificado al vacío que se suministra templado revenido. Puede ser nitrurado para aumentar la resistencia al desgaste y puede ser templado a la llama para aumentar su dureza. Excelente pulibilidad y apto para fotograbado. Buena maquinabilidad y dureza homogénea. Se utiliza para moldes de inyección o matrices de extrusión de termoplásticos, moldes de soplado, herramientas de conformado sin arranque de viruta (templadas a la llama o nitruradas), ejes y otros componentes estructurales. Las propiedades del material se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2.6 Impax supreme resistencia a la tensión ^[2.6]

Temperatura de ensayo	20°C	200°C
Máxima resistencia a la tensión N/mm ²	1020	930
Límite de elasticidad N/mm ²	900	800

Tabla 2.7 Impax supreme templado y revenido 310 HB ^[2.7]

Temperatura	20°C	200°C
Densidad Kg/m ³	7800	7750
Coeficiente de dilatación térmica por °C a partir de 20°C	-	12,7 x 10 ⁻⁶
Conductividad térmica W/m°C	29	30
Módulo de elasticidad MPa kp/mm ²	205000 20900	200000 20400
Calor específico J/Kg°C	460	-

Tabla 2.8 Impax supreme resistencia a la compresión ^[2.8]

Límite de resistencia a la compresión N/mm ²	850 - 1000
---	------------

2.5.2. RAMAX HH

Uddeholm Ramax HH es un acero inoxidable ideal para placas porta-moldes de moldes de inyección de plásticos que se suministra en estado templado y revenido. Se caracteriza por una buena resistencia a la corrosión, dureza uniforme a través de sus dimensiones y buena maquinabilidad. Esta última propiedad reduce notoriamente los costos de fabricación del molde debido a un menor desgaste de la herramienta de corte y una mayor velocidad de trabajo. También se recomienda para moldes de bajo requerimiento de pulibilidad y matrices de extrusión de plásticos. Las propiedades del material se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2.9 Ramax HH templado y revenido 340 HB [2.9]

Temperatura	20°C	200°C
Densidad Kg/m ³	7700	-
Coefficiente de dilatación térmica por °C a partir de 20°C	-	10,8 x 10 ⁻⁶
Conductividad térmica W/m°C	-	24
Módulo de elasticidad MPa Psi	215000 31,2 x 10 ⁶	205000 29,7 x 10 ⁶
Calor específico J/Kg°C	460	-

Tabla 2.10 Ramax HH resistencia a la tensión [2.10]

Temperatura de ensayo	20°C	200°C
Máxima resistencia a la tensión N/mm ²	1140	1020
Límite de elasticidad N/mm ²	990	920
Elongación %	12	10

2.5.3. STAVAX ESR

Uddeholm Stavax ESR es un acero inoxidable, templable, de buena estabilidad dimensional en el tratamiento térmico, muy buena pulibilidad y buena resistencia al desgaste. Se recomienda para herramientas que deban soportar almacenamiento de humedad a ataques corrosivos como inyección de PVC y acetatos o herramientas que deban soportar desgaste por cargas abrasivas como moldeo de termo rígidos en series largas de fabricación; ejemplo: componentes eléctricos, cubiertos y vasos descartables, etc.

Su gran calidad de pulido permite producir piezas ópticas como lentes de cámaras fotográficas y cristales de lentes de sol o artículos médicos (jeringas, frascos para análisis, etc.). Ideal también para moldes de soplado de PVC y PET y para matrices de extrusión de plásticos.

Las propiedades del material se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2.11 Stavax ESR templado y revenido 340 HB [2.11]

Temperatura	20°C	200°C	400°C
Densidad Kg/m ³	7800	7750	7700
Coefficiente de dilatación térmica por °C a partir de 20°C	-	$11,0 \times 10^{-6}$	$11,4 \times 10^{-6}$
Conductividad térmica W/m°C	16	20	24
Módulo de elasticidad MPa Psi	200000 $29,0 \times 10^6$	190000 $27,6 \times 10^6$	180000 $26,1 \times 11^6$
Calor específico J/Kg°C	460	-	-

Tabla 2.12 Stavax ESR resistencia a la tensión [2.12]

Dureza	50 HRC	45HRC
Resistencia a la tracción MPa Psi	1780 256000	1420 206000
Resistencia a la fluencia MPa Psi	1460 213000	1280 185000

La Figura 2.18 muestra el comportamiento de la resistencia a la corrosión del material Stavax ESR al aumentar la temperatura, mostrando que tiene una tendencia a disminuir hasta los 500°C para luego tener un pequeño incremento:

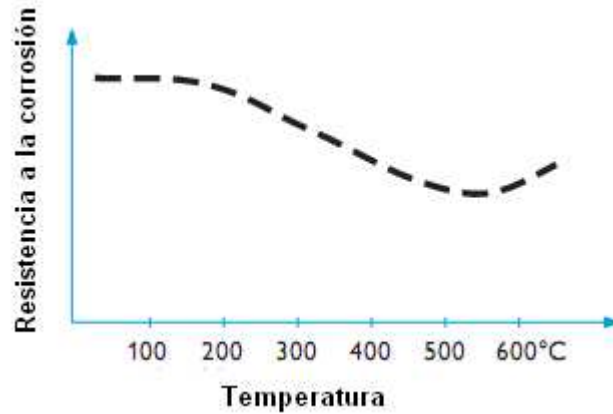


Figura 2.18 Resistencia a la corrosión para Stavax ESR ^[2.18]

2.5.4. CORRAX

Uddeholm Corrax es un acero inoxidable de ventajosa dureza flexible entre 32 y 50 HRC, la cual se obtiene mediante un tratamiento de temple por envejecimiento a temperaturas entre 425 y 600 °C, lo que hace que sea extremadamente estable dimensionalmente durante el tratamiento. Posee una alta uniformidad de las propiedades y es apto para soldar sin precalentar.

Luego del mecanizado por electroerosión no aparece capa blanca y su resistencia a la corrosión es superior a la del AISI 420 o W. Nr. 1.2083. Se utiliza para moldes de inyección de plásticos corrosivos, caucho, industria médica y alimenticia. Matrices de extrusión de plásticos y piezas de ingeniería. Se suministra tratado en solución a aprox. 32 HRC.

Las propiedades del material se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2.13 Corrax envejecimiento a 46 HRC [2.13]

Temperatura	20°C	200°C	400°C
Densidad Kg/m ³	7700	-	-
Coeficiente de dilatación térmica por °C a partir de 20°C	-	11,7 x 10	12,3 x 10
Conductividad térmica W/m°C	-	18	21
Módulo de elasticidad MPa	200000	190000	170000

Tabla 2.14 Corrax resistencia a la tensión a temperatura ambiente [2.14]

	Tratado en solución 34 HRC	Envejecimiento 40 HRC	Envejecimiento 46 HRC	Envejecimiento 50 HRC
Límite de elasticidad MPa	700	1000	1400	1600
Resistencia a la tensión MPa	1100	1200	1500	1700

Tabla 2.15 Corrax resistencia a la compresión a temperatura ambiente [2.15]

	Tratado en solución 34 HRC	Envejecimiento 40 HRC	Envejecimiento 46 HRC	Envejecimiento 50 HRC
Límite de resistencia a la compresión N/mm ²	900	1300	1600	1800

2.6. ESTUDIO DE MATERIALES UTILIZADOS EN EL MEDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MOLDES PARA EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS

En la construcción de moldes, para extrusión de plásticos se pueden utilizar distintos tipos de aceros, la elección del material se deberá realizar posterior a la simulación y cálculo de esfuerzos que se generarán en el interior del mismo, en el Ecuador existen distintos tipos de aceros que las compañías recomiendan para la construcción de estos, entre los aceros que encontramos a disposición, en el mercado tenemos:

2.6.1. ACERO BÖHLER M238

Propiedades

Acero pre-bonificado para moldes de tamaño medio y grande para la transformación de materias plásticas, porta moldes para moldes de plástico, componentes para maquinaria y utillajes en general.

El contenido de Ni garantiza una resistencia uniforme hasta el núcleo también en grandes dimensiones por encima de 400 mm. Naturalmente, el acero BÖHLER M238 se suministra con una buena maquinabilidad.

Estado de Suministro

Bonificado a 1000 N/mm² (aprox. 300 HB). Por lo tanto, no se requiere un tratamiento térmico. En caso de un tratamiento térmico posterior se debe tomar en cuenta la composición química que se muestra en la tabla 2.16.

Tabla 2.16 Composición Química acero BÖHLER M238 (valores aproximados en %) [2.16]

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>
0.38	0.30	1.50	2.00	0.20	1.10

Ventajas del Acero BÖHLER M238

- Bonificación uniforme hasta el núcleo.
- Apto para todo el proceso de nitruración destinado a aumentar la resistencia al desgaste.
- Apto para el cromado duro y para cualquier tratamiento galvánico de la superficie, que mejora la dureza y la resistencia a la corrosión.
- Una maquinabilidad mejorada, tiempos de mecanización más cortos, reducción de los costes de herramientas.
- Suministro del molde en estado pre bonificado listo para su puesta en máquina. Eliminación del tratamiento térmico y otros costosos procesos posteriores.

Tratamiento térmico realizado en el acero

En este acero se realiza un tratamiento de revenido, que es un calentamiento lento a temperatura de revenido inmediatamente después del temple / tiempo de permanencia en el horno: 1 hora por cada 20 mm de espesor de la herramienta, pero por lo menos dos horas/enfriamiento al aire. El material entregado es elevado a una temperatura de temple de 850°C.

Las variaciones de dureza y resistencia a la tracción en función de la temperatura de revenido se muestran en los siguientes gráficos:

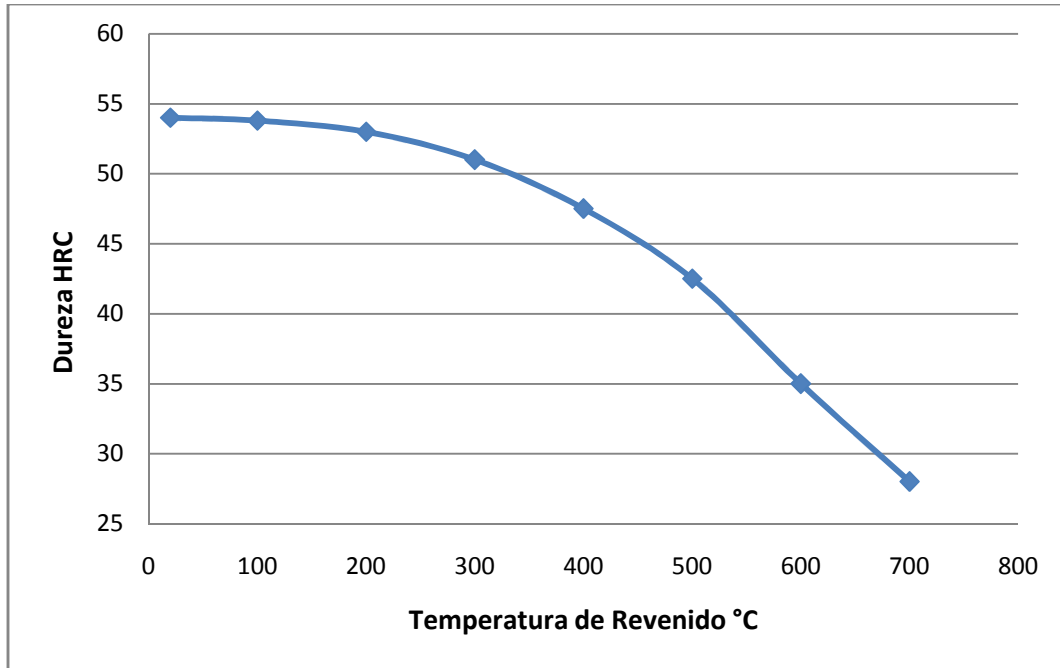


Figura 2.19 Dureza – Temperatura revenido para el acero BÖHLER M238 [2.19]

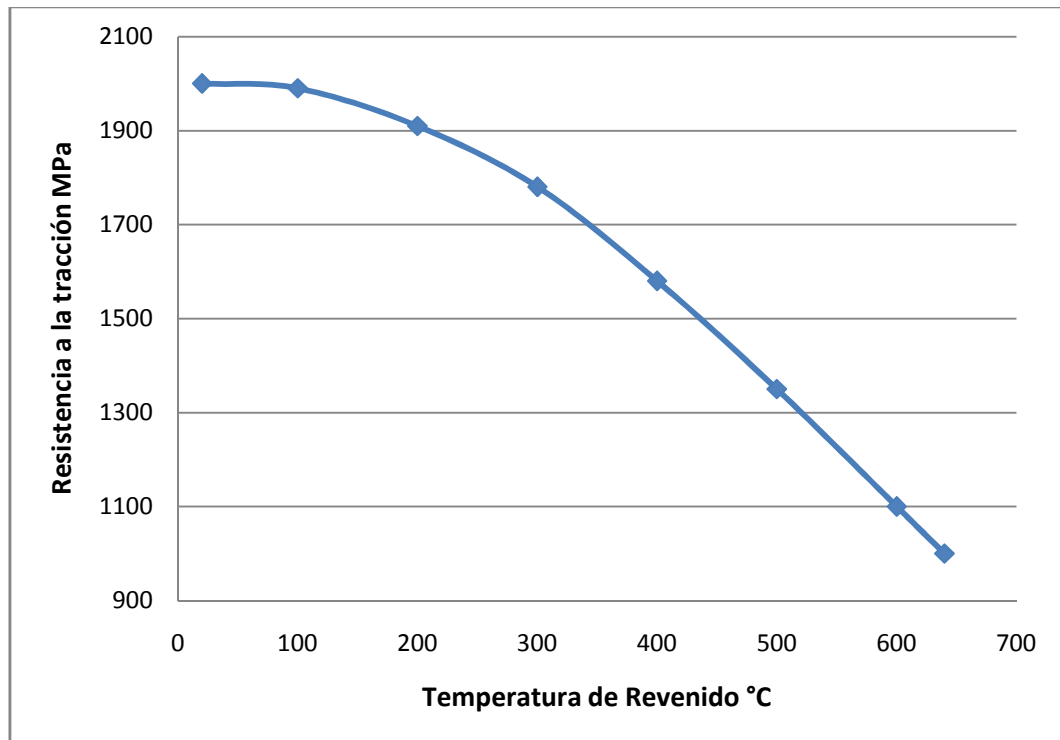


Figura 2.20 Resistencia a la tracción – Temperatura de revenido para el acero BÖHLER M238 [2.20]

2.6.2. ACERO BÖHLER M201

Aplicaciones

Las aplicaciones de este material son en la construcción para moldes de tamaño medio y grande para la transformación de materiales plásticos, armazones de moldes para las industrias de plásticos y de fundición inyectada. Elementos para la construcción de maquinaria.

Estado de Suministro

Templado y revenido a 1000 N/mm² (aprox. 300 HB). Por lo tanto, no se requiere un tratamiento térmico. En caso de un tratamiento térmico posterior se debe tomar en cuenta la composición química que se muestra en la tabla 2.16

Tabla 2.17 Composición Química acero BÖHLER M201 (valores aproximados en %) [2.17]

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
0.4	0.30	1.50	2.00	0.20

Ventajas del ACERO BÖHLER M201

- Alto grado de pureza y gran homogeneidad
- Resistencia elevada y uniforme
- Propiedades mecánicas óptimas
- Alta tenacidad
- Producción más económica junto con una calidad más elevada del material

Tratamiento térmico realizado en el acero

En este acero se realiza un tratamiento de revenido, que es un calentamiento lento a temperatura de revenido. El material entregado es elevado a una temperatura de temple de 850°C.

Las variaciones de dureza y resistencia a la tracción en función de la temperatura de revenido se muestran en los siguientes gráficos:

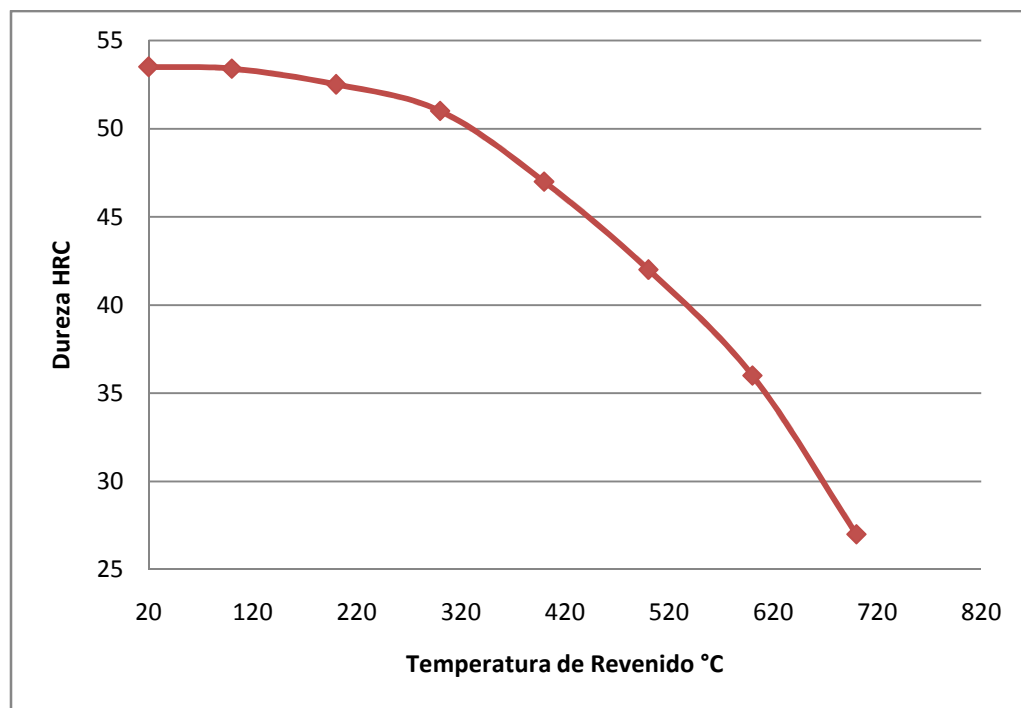


Figura 2.21 Dureza – Temperatura del revenido para el Acero BÖHLER M201 [2.21]

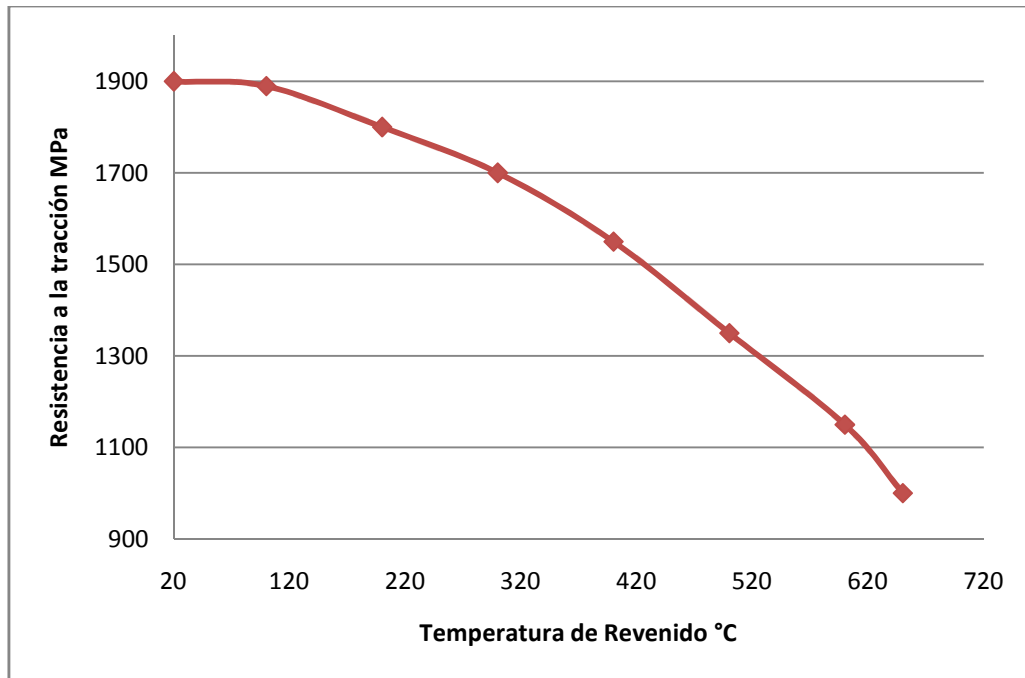


Figura 2.22 Resistencia a la tracción – temperatura de revenido para el Acero BÖHLER M201 [2.22]

2.5.1. ACERO BÖHLER V945 (AISI 1045)

Características

Es un acero utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarias en condición de suministro. Este acero medio carbono puede ser forjado con martillo responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Cuando se hacen prácticas de soldadura adecuadas, presenta soldabilidad adecuada. Por su dureza y tenacidad es adecuado para la fabricación de componentes de maquinaria.

Empleo

Este acero principalmente es utilizado en la fabricación de partes de maquinaria sometida a esfuerzos normales, sin embargo, las características

mecánicas pueden ser mejoradas en este acero si se realiza un correcto tratamiento térmico

Estado de Suministro

Este acero se lo encuentra en el mercado normalizado a 900°C y recocido a 790°C, con estos tratamientos se alcanzan valores por debajo de lo requerido, 370 N/mm² (aprox. 180 HB), es por eso que previa utilización de este es necesario realizar un tratamiento térmico de bonificación para lo cual se debe tomar en cuenta la composición química que se muestra en la tabla 2.17.

Tabla 2.18 Composición Química acero BÖHLER V945 (AISI 1045)
(Valores aproximados en %) ^[2.18]

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>
0.45	0.30	0.70

Ventajas del acero BÖHLER M201

- Facilidad de comercialización en el mercado se lo encuentra en el diámetro y longitud necesaria.
- Costos inferiores a los antes mencionados incluyendo el tratamiento térmico.
- Propiedades mecánicas óptimas con el correcto tratamiento térmico.

Tratamiento térmico realizado en el acero

En este acero se realiza un tratamiento de revenido, que es un calentamiento lento a temperatura de revenido. El material entregado es elevado a una temperatura de temple de 800°C y posteriormente se realizará el tratamiento de revenido a una temperatura de 450 °C, después de realizar este tratamiento, las características mecánicas mejorarán hasta alcanzar un límite

elástico de 560 N/mm². Las variaciones de dureza y resistencia a la tracción en función de la temperatura de revenido se muestran en los siguientes gráficos:

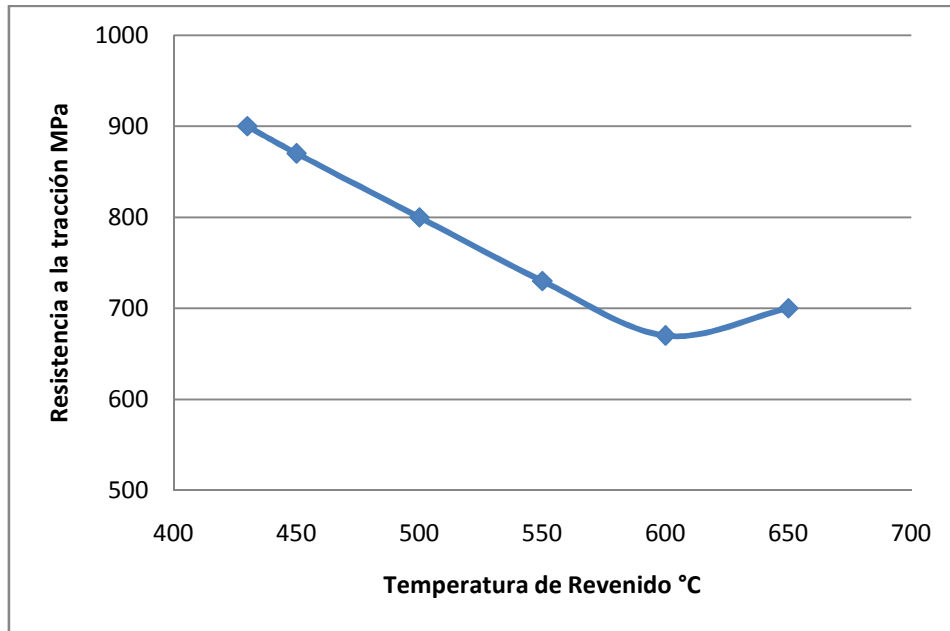


Figura 2.23 Resistencia a la tracción – Temperatura de revenido para el acero BÖHLER V945 (AISI 1045) [2.23]

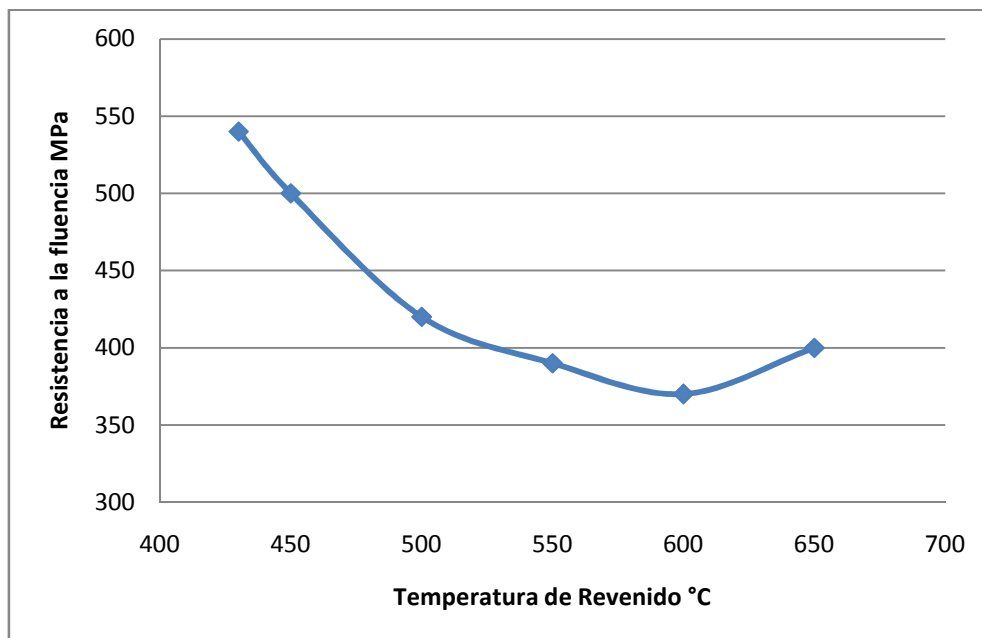


Figura 2.24 Resistencia a la fluencia – Temperatura de revenido para el acero BÖHLER V945 (AISI 1045) [2.24]

2.7. PROCESO DE EXTRUSIÓN EN EL MOLDE

El producto de extrusión se obtiene al obligar al material fundido a que pase a través de un dado con una cierta forma y generar una pieza extruida, perfilada y continua. La interacción del extrusor y su dado pueden comprenderse observando sus respectivas características.

- Si la presión no se acumulara, por ejemplo, que no hubiere placa rompedora o dado, la producción sería la máxima, Q_{\max} . Se puede utilizar la ecuación ideal para el flujo de arrastre.
- Si la resistencia es máxima, $Q = 0$, y se puede igualar el flujo de arrastre con el flujo de presión.
- Se requiere una presión para que trabaje el dado que se encuentra en el extremo de salida del extrusor, es necesaria la presión simplemente para forzar el paso del material fundido a través del dado. La característica del dado es, por lo tanto, opuesta en forma; la producción máxima se deberá a una presión máxima.

En el diseño óptimo de un dado de extrusión es necesario mantener un flujo laminar en el material fundido. Si los cambios de sección son abruptos se producen “puntos muertos” en las esquinas donde circula el material fundido como en un remanso y esto conduce a una pieza obtenida por extrusión con temperatura y tensiones anteriores no uniformes. Como se muestra en la Figura 2.25 en las dos primeras opciones de patrones de dado se van a producir puntos muertos y no va existir la longitud para la conformación del material por lo que se necesita una salida ahusada que permita un cambio de sección paulatino como muestra el tercer esquema.

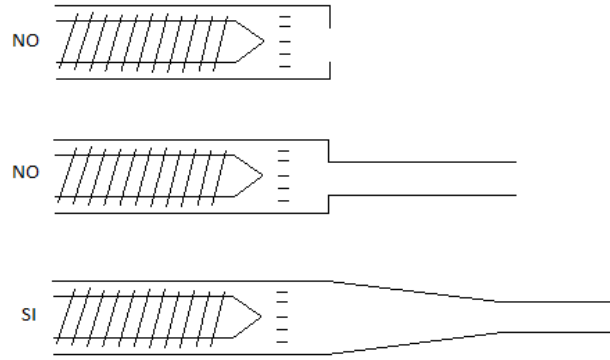


Figura 2.25 Patrones de un dado para varilla [2.25]

Además, en cualquier flujo convergente, hay fuerzas de tracción así como de corte. Al ser las propiedades a la tracción importantes en diversos métodos de obtención de polímeros, estos influyen de manera significativa en el comportamiento de los dados.

En la disposición de flujos paralelos, se ve que las líneas de corriente son paralelas; un elemento de fluido se mantiene intacto conforme avanza a lo largo del canal. En el caso de flujos convergentes, las líneas de corriente convergen y el elemento de fluido se distorsiona debido al esfuerzo de tracción que se lleva a cabo, es decir, el material fundido se estira a la vez que se hace más estrecho, al dirigirse hacia la salida.

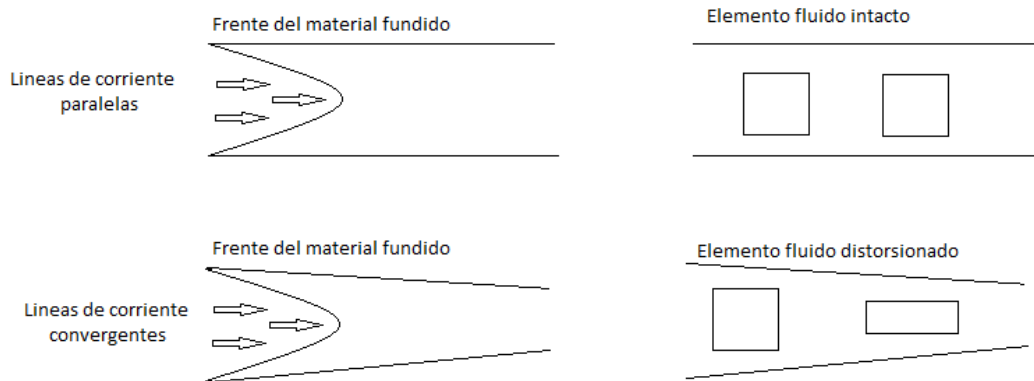


Figura 2.26 Flujos paralelos y convergentes [2.26]

2.7.1. MOLDE DE EXTRUSIÓN

La función del dado de extrusión es aceptar el fluido fundido que viene del extrusor y darle la forma final con la mínima desviación de las dimensiones de la sección transversal y salida uniforme a una razón de salida rápida.

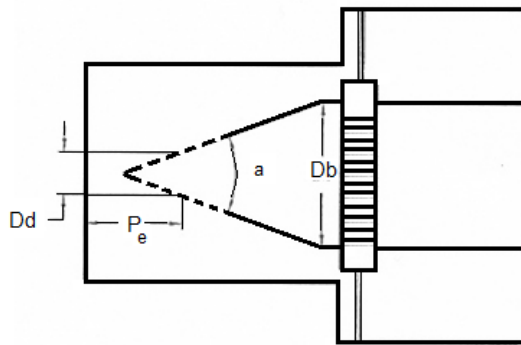


Figura 2.27 Esquema del molde de extrusión [2.27]

- Dd Diámetro del orificio del dado
- Db Diámetro del agujero del barril del extrusor
- a Ángulo de entrada
- Pe Longitud paralela del dado

La razón de flujo está influenciada por todas las variables que puedan existir durante la extrusión, la presión y la temperatura en el dado, profundidad de la hélice, etc.

2.7.2. EFECTOS DE LA ENTRADA DEL MOLDE

Si los esfuerzos de tracción son grandes, realmente sobrepasan la resistencia a la tracción del material fundido, la cual es, por lo común, de alrededor de 10^6 Nm^2 . Cuando esto pasa, las líneas de corriente se vuelven no solo caóticas sino también discontinuas; la suavidad del flujo laminar deseable se pierde

completamente. El producto de extrusión que sale del dado será de forma irregular. Este fenómeno se conoce como *fractura del fundido*.

Al ser la salida del dado ahusada se busca conseguir los siguientes efectos:

- Eliminar los puntos muertos de las esquinas y mantener con esto un recorrido térmico y un esfuerzo cortante estable.
- Reducir los esfuerzos de tracción y con ello, minimizar también la distorsión de las líneas de corriente.

2.7.3. PRINCIPALES COMPONENTES DE UN CABEZAL DE EXTRUSIÓN

2.7.3.1. Plato rompedor y filtros

Constituyen el punto de transición entre la extrusora y el cabezal. A estos componentes les corresponde una parte importante de la calidad del material extruido. El plato rompedor es el primer elemento del cabezal destinado a romper con el patrón de flujo en espiral que el tornillo imparte; mientras que la función de los filtros es la de eliminar del material extruido partículas y/o grumos provenientes de impurezas, carbonización, pigmentos y/o aditivos, etc.

En lo que respecta a su diseño, el plato rompedor no es más que una placa cilíndrica con varias perforaciones. Por otro lado, las mallas deben ser fabricadas con acero inoxidable, ya que las compuestas con cobre o bronce tienen un efecto catalítico sobre las reacciones termo-oxidativas.

2.7.3.2. Torpedo

Algunos cabezales de extrusión suelen presentar en el ducto de acople entre la extrusora y el cabezal, un elemento que contribuye con la función del plato

rompedor (modificar el patrón de flujo en espiral a uno longitudinal). Por su geometría, a este dispositivo se le suele denominar torpedo

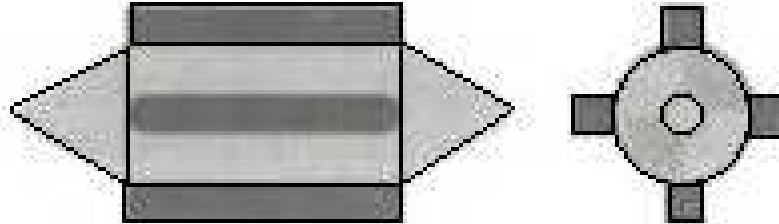


Figura 2.28 Esquema del torpedo ^[2.28]

2.7.3.3. Boquilla

La boquilla de extrusión es el componente del cabezal encargado de la conformación final del material extruido. Se debe velar por que el polímero fluya, con volumen y velocidad de flujo uniforme, alrededor de toda la circunferencia de la boquilla, de manera de lograr espesores uniformes. Los diseños actuales de boquillas presentan dos secciones claramente definidas. La primera de estas secciones es conocida como:

2.7.3.3.1. Cámara de relajación

Tiene como propósito producir la desaceleración del material e incrementar el tiempo de residencia en la boquilla de manera tal que el polímero relaje los esfuerzos impartidos por el paso a través de los paquetes de filtros y el plato rompedor.

2.7.3.3.2. Cámara de descarga

Cámara de descarga (Die land).- Produce el formado del perfil deseado con las dimensiones requeridas.

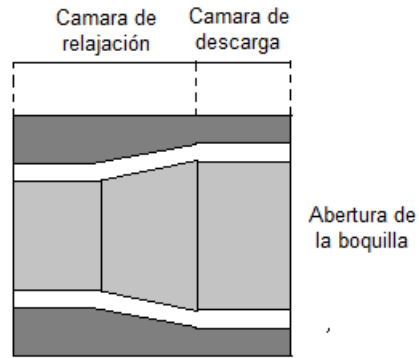


Figura 2.29 Esquema de la boquilla [2.29]

Los parámetros básicos para la especificación de una boquilla son el diámetro y la abertura de la salida

2.7.3.4. Adaptadores

Son requeridos cuando la boquilla no es diseñada específicamente para un determinado extrusor. Debido a que los fabricantes de extrusoras y boquillas no siempre son los mismos, el uso de adaptadores suele ser común.

2.7.4. CALCULO DEL ÁNGULO PARA FLUIDO CÓNICO

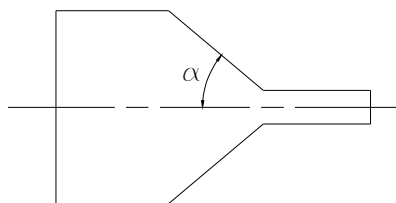


Figura 2.30 Ángulo fluido cónico

$$a = a \tan \left[\left(\frac{2\eta}{\lambda} \right)^{1/2} \right] \cdot \frac{180}{\pi} \quad \lambda = 3\eta$$

(2.16)

La salida alargada del dado es importante para estabilizar una disposición paralela de líneas bajas antes de la salida del dado. También aumenta el tiempo de tratamiento y eso ayuda a eliminar la memoria del proceso anterior, por ejemplo, la mayoría de giro del tornillo o de una construcción o cambio de dirección de la ruta de flujo. Tanto más suaves sean las líneas de corriente, cuanto más rápido se llevara a cabo la operación y el producto será mejor. Si no se previenen los efectos de la memoria, el resultado será probablemente una pieza distorsionada.

Debido a la rapidez cortante y, en consecuencia las viscosidades aparentes que varían para las diferentes etapas del proceso se vuelve complejo cuantificar la distorsión, sin embargo existe una técnica interesante. Esta consiste en encontrar el *Número de Débora*, N_{deb} .

Los intervalos de tiempo característicos para los cuales tiene memoria un material fundido se relacionan con su *tiempo de relajación*; el cual se encuentra a partir de la viscosidad y del modulo elástico; están son las cantidades que reflejan sus comportamientos viscosos y elásticos ante un esfuerzo que se les aplique, y en relación da el *tiempo natural o de relajación* para el material.

$$Tiempo_de_relajacion = \frac{viscocidad}{modulo_elastico} = \frac{Ns \times m^2}{m^2 \times N} = s \quad (2.17)$$

Se necesita encontrar este tiempo natural para el material que se usa bajo las condiciones de manufactura. Luego se compara con los intervalos del tiempo del proceso; el resultado de esto es el número de Débora.

$$N_{deb} = \frac{Tiempo_de_relajacion_del_material_en_el_proceso}{Intervalos_de_tiempo_del_proceso} \quad (2.18)$$

Si $N_{deb} > 1$, el proceso es principalmente elástico. Si $N_{deb} < 1$, el proceso es predominada mente viscoso; y esto conduce a que el material sometido a la

extrusión se enrosque. Esto sucede así debido a que el proceso que se lleva a cabo al dar la vuelta, aunque consume bastante tiempo, es elástico, es decir, las cadenas no se realinean de manera permanente. La siguiente deformación en un corto tiempo en el dado, aunque se lleva a cabo alto esfuerzo de corte, no elimina esta distorsión elástica, la cual puede liberarse cuando el material sometido a extrusión deja la restricción del dado con el resultado de que se enrosca.

En la práctica, es difícil saber, con frecuencia, exactamente la magnitud de las velocidades de corte, o dar valores a la viscosidad y al módulo; puede ser que no se conozca la contribución de la componente de tracción. En consecuencia el diseñador tiene que recurrir a la experiencia y a un sentimiento instintivo sobre lo que es operable. Se recurre por lo común a la práctica de prueba y error para usar los dados adecuados. El número de Débora ayuda a comprender el comportamiento de los polímeros fundidos, algunas veces inesperado.

2.7.5. INESTABILIDADES EN LA SALIDA DEL MOLDE

El defecto más común que se encuentra en la salida del dado se conoce como *piel de tiburón*. Consiste en un arrugamiento de la superficie sometida a extrusión. Este es otro defecto que se debe a los esfuerzos de tracción; se genera de la manera siguiente.

El material fundido, conforme avanza a lo largo del canal del dado, tiene un perfil de velocidad, con una velocidad máxima en el centro y una velocidad cero en la pared. Conforme abandona los bordes del dado, el material de la pared tiene que acelerarse hasta la velocidad a la cual el producto sale del dado. Esto genera esfuerzos a la tracción y, si el esfuerzo excede la resistencia a la tracción, la superficie se rompe, generando el defecto visual. Como es de esperarse, los materiales de módulo bajo que tienen alto alargamiento son los menos afectados; los materiales estructurados, con alto contenido de materiales de relleno y de baja elasticidad tienen más fácilmente el defecto de piel de tiburón.

Si se favorecen las condiciones que causan la piel de tiburón, es decir, se vuelve excesiva la presión en el extrusor o disminuye la temperatura del dado, el efecto provoca una apariencia de grano grueso, que por lo común se conoce como *cáscara de naranja*. Poco a poco, la restitución de los esfuerzos de tracción se exagera y el material sometido a extrusión en su totalidad de pronto “se retrae”. El resultado es el “*abambuamiento*”, llamado así porque la pieza sometida a extrusión se asemeja en apariencia al bambú como se muestra en la Figura 2.31. El calentamiento extra del dado ayuda con frecuencia a remediar estos defectos, al relajar térmicamente los esfuerzos y disminuir la viscosidad.

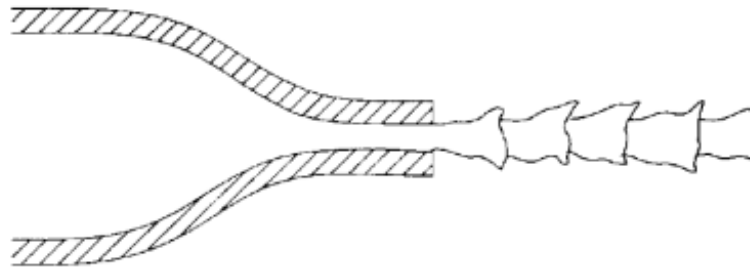


Figura 2.31 Abombamiento a la salida del molde ^[2.31]

Una idea errónea pero común es que la piel de tiburón es una especie de fractura de fundido suave, y es cierto que la formación de la piel de tiburón, al incrementarse la velocidad del extrusor, puede estar seguida por el rompimiento completo de la pieza sometida a extrusión que caracteriza a la fractura del fundido si aumenta más todavía la velocidad. Sin embargo los dos fenómenos tienen diferentes orígenes, de modo que la acción que se tome para prevenir uno de ellos puede contrarrestar el otro.

2.7.6. HINCHAMIENTO EN EL MOLDE

Es el efecto por el cual el polímero se hincha cuando sale del dado. El resultado es una pieza que tiene dimensiones diferentes a las del orificio del dado. Así, una varilla sometida a extrusión sería de mayor diámetro y una tubería sería de pared más gruesa, es decir se incrementa el diámetro externo y disminuye el diámetro

interno. El hinchamiento en el dado es otro resultado de la componente elástica del comportamiento total que tiene el polímero fundido al someterse al esfuerzo. Esto lo provoca la recuperación de la deformación elástica cuando el material sometido a extrusión sale de la constricción del canal del dado y antes que se solidifique como muestra la Figura 2.32.

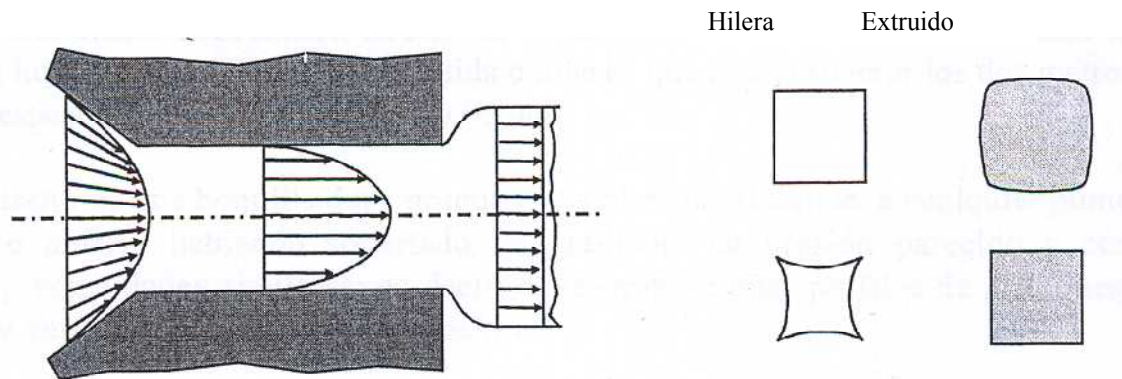


Figura 2.32 Comparación de la forma del material en la hilera y extruido [2.32]

2.7.7. EXTRUSIÓN DE PERFILES

La extrusión de perfiles es la manufactura directa de un producto en el dado de extrusión. Así, por necesidad, estos productos son largos y continuos cuyo perfil de sección transversal se obtiene mediante la forma del dado. Por ejemplo en el dado para tubos, el problema principal es crear un anillo a través del cual salga el tubo. Esto se logra mediante un mandril en posición central que se mantiene en su lugar por medio de la “araña”, el cual es un dispositivo que, por lo común, tiene ajustadores de tornillo, que mantienen centrado el mandril. Estos dispositivos interrumpen el flujo del material fundido alterando las líneas de corriente, de tal forma que aparecen las componentes de tracción. Los ahusamientos graduales, que tienen una desembocadura, son dispositivos útiles para mantener y restablecer, hasta donde sea posible, el flujo laminar y las líneas de corriente

paralelas, una vez que las líneas de flujo se reúnen después de pasar por las piernas de la araña.

Otros perfiles crean problemas aun mayores. Si el perfil que se necesita no es circular, los patrones de flujo y las velocidades varían en diferentes sitios, y el hinchamiento en el dado no es igual en todos los puntos. Por eso se tiene que “descuadrar” el perfil del dado para lograr la forma que se necesita. En la Figura 2.33 se muestran dos esquemas simples, donde las líneas discontinuas representan los perfiles aproximados de los dados que producen las formas deseadas.

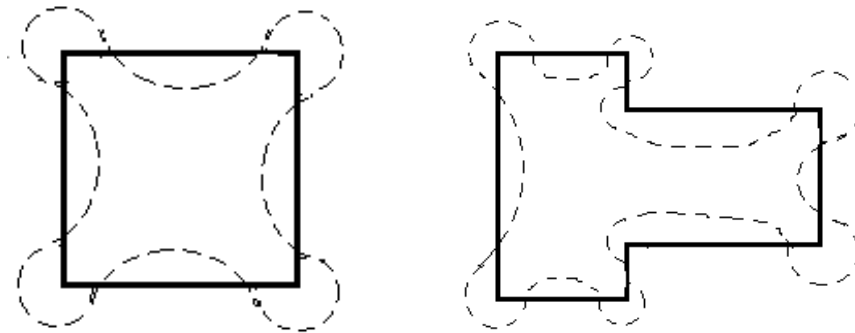


Figura 2.33 Perfiles de ciertas cámaras de descarga [2.33]

Las líneas punteadas representan los perfiles que se usan para producir las formas que se presentan las líneas continuas. La utilización de estos conceptos para obtener perfiles muy complejos, como marcos de cloruro de polivinilo para ventana, requiere gran habilidad y experiencia en el diseño y, por lo común, mucha practica de prueba y error. Los dados que se usan para elaborar perfiles complejos son muy caros, por lo cual se toman muchas precauciones para usarlos y se protegen contra daños accidentales.

2.8. ESTADO DE ESFUERZOS EN UN PUNTO DEL MOLDE, TEORÍA DE FALLA

Antes de considerar los detalles de los esfuerzos en un punto y las relaciones entre las componentes del esfuerzo, resulta importante hacer notar la relación global entre la carga y las componentes del esfuerzo en un punto. La palabra carga se la va utilizar de manera genérica de forma que sea una influencia externa como una fuerza, par de torsión o una tracción cortante. Por lo general, los esfuerzos en un punto para un cuerpo elástico homogéneo son proporcionales a la carga elevada a alguna potencia, digamos, P^m . En tensión, compresión cortante y flexión simple, el exponente m es igual a la unidad. Para esfuerzos de contacto de cilindros, $m=1/2$ y en esferas $m=1/3$. No obstante los esfuerzos en un punto cambian a medida que la carga varia. Si $m=1$ y la carga se incrementa al doble, todas las componentes del esfuerzo se duplican. Si $m=1/2$ y la carga aumenta al doble, todas las componentes del esfuerzo son mayores por un factor de $\sqrt{2}$.

Por medio del control de la geometría y del material, que incluye un tratamiento termo mecánico, el diseñador mantiene la integridad del diseño; es decir lo hace funcional, seguro, confiable, utilizable, fabricarle y comercializable. La pérdida de función se debe anticipa, es decir, cuando las partes fluyen, se rompen, se fatigan, termo fluyen, etc. El punto de vista más útil del problema comienza con el entendimiento de la influencia de una carga externa en los esfuerzos dentro del cuerpo.

2.8.1. COMPONENTES DEL ESFUERZO

Los esfuerzos normales dirigidos hacia fuera se llaman *esfuerzos de tensión o de tracción* y se consideran positivos. Los esfuerzos cortantes sobre una cara positiva de un elemento resultan positivos si actúan en la dirección positiva de un eje de referencia.

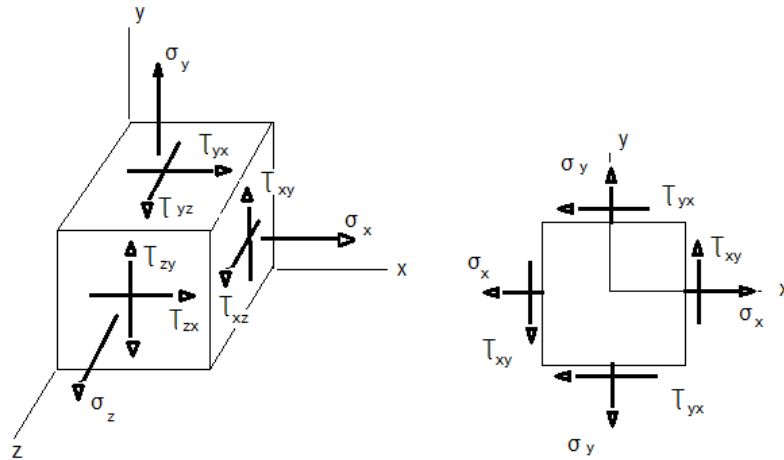


Figura 2.34 Esfuerzo tridimensional [2.34]

- Los círculos de Mohr para el esfuerzo plano consisten en tres círculos para el esfuerzo triaxial. Cuando se conocen los tres esfuerzos principales, se deducen otros. Lo anterior resulta en otra reducción drástica de seis componentes a tres.
- Las investigaciones de los esfuerzos sobre superficies octaédricas asociadas con las tres direcciones de los esfuerzos principales, establecen la descripción por medio de dos componentes, los esfuerzos normales octaédricos y el esfuerzo cortante octaédrico, lo cual significa una reducción en la complejidad.
- La energía de distorsión por volumen unitario en un punto es una función de un solo componente de esfuerzo llamado esfuerzo normal de *Von Mises*. Para materiales que pierden la función por fluencia o fatigamiento, en respuesta al nivel de intensidad de la energía de distorsión, el esfuerzo de von Mises es el único que describe la condición del esfuerzo en un punto.
- En la hipótesis y teorías de falla se emplean una o más de estas descripciones de una, dos y tres componentes del esfuerzo en un punto, para explicar el origen de la falla en una clase, o clases, de materiales.

Un principio de superposición resulta apropiado ya que los esfuerzos (en un punto sobre un plano dado) debidos a cargas externas diferentes se calculan por

separado y luego se suman algebraicamente, a condición de que los esfuerzos no sobrepasen el límite de proporcionalidad del material, y en ausencia de alabeo. Si acaso existe un patrón para analizar problemas que impliquen esfuerzos es el siguiente:

- Identifique las cargas externas y verifique las ecuaciones de equilibrio y los diagramas de cuerpo libre, para asegurar que se han considerado todas las cargas y sus sentidos.
- Use mas diagramas de cuerpo libre para encontrar las cargas internas.
- Determine los esfuerzos correspondientes.
- Utilice los círculos de Mohr para identificar los tres esfuerzos principales, los tres esfuerzos cortantes máximos y los esfuerzos sobre los planos de interés.
- Compare las clases de esfuerzos que podrían causar la falla con las resistencias correspondientes a fin de evaluar la posibilidad de falla.

Fórmula para cálculo de esfuerzos principales:

- Esfuerzo normal máximo σ_1
- Esfuerzo normal mínimo σ_2

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.19)$$

- Esfuerzo cortante τ_1
- Esfuerzo cortante τ_2

Se debe poner atención especial al hecho de que un valor extremo del esfuerzo cortante quizá no sea el mismo que el valor máximo.

Para poder determinar para qué cantidad de esfuerzo aplicado se producirá una falla, se utilizan algunas teorías de falla.

Todas las teorías de falla se basan en la comparación del esfuerzo actuante contra el resultante aplicado en una prueba uniaxial de tensión o compresión.

2.8.3. ESFUERZO NORMAL MÁXIMO

La falla ocurrirá en la parte de cualquiera de los esfuerzos normales principales excede el esfuerzo normal principal que da lugar a la falla en la prueba uniaxial simple.

$$\sigma_{eq} = \begin{matrix} |\sigma_1| \\ |\sigma_2| \\ |\sigma_3| \end{matrix}$$

2.8.4. ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO

Para materiales dúctiles la falla ocurre en una parte si cualquiera de los esfuerzos cortantes principales excede el esfuerzo cortante principal que da lugar a la falla en la prueba uní-axial simple.

$$\sigma_{eq} = 2\tau_{max} \tag{2.20}$$

2.8.5. ENERGÍA DE DISTORSIÓN (VON MISES)

La energía de deformación se compone de la energía de deformación (cambio de volumen) y de la distorsión.

$$\mu = \mu_v + \mu_d \quad (\mu_{volumen} + \mu_{distorsion}) \tag{2.21}$$

La falla ocurre si la energía de distorsión por volumen unitario excede la correspondencia a una prueba de tensión unitaria en la falla.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_1 \cdot \sigma_3} \quad (2.22)$$

Cuando se tiene un esfuerzo normal y un esfuerzo cortante:

2.8.5.1. Teoría conservadora

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (2.23)$$

2.8.5.2. Teoría optimista

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (2.24)$$

2.8.6. CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

En una pieza sometida a esfuerzos, si se llegan a presentar cambios abruptos en la geometría de la pieza, se presenta una concentración de las “líneas de esfuerzo” en los puntos donde cambia abruptamente la geometría.

Los cambios de geometría se presentan si hay:

- Cambios de forma y tamaño de la sección
- Muecas
- Estrías
- Raspaduras
- Agujeros
- Chaveteras
- Marcas de herramientas
- Inclusiones y defectos de material
- Temperatura

En estos puntos se puede calcular un factor de concentración de esfuerzos K.

$$K = \frac{\text{Valor mas alto del esfuerzo real en el cambio}}{\text{esfuerzo no min al calculado}} \quad (2.25)$$

2.8.7. ESFUERZOS EN CILINDROS

En los recipientes cilíndricos a presión, cilindros hidráulicos, cañones de pistolas y tubos de conducción de fluidos a altas presiones, se desarrollan esfuerzos radiales y tangenciales con magnitudes que dependen del radio del elemento bajo consideración. Al determinar el esfuerzo radial σ_r , y el esfuerzo tangencial σ_t , que se muestran en la Fig. 2.29 se supone que la elongación longitudinal es constante alrededor de la circunferencia del cilindro. En otras palabras, una sección recta (plana) del cilindro permanece plana después de ser sometida a un esfuerzo. Las formulas del esfuerzo tangencial y radial son las siguientes:

$$\sigma_t = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2 - r_i^2 r_o^2 \frac{p_o - p_i}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2.26)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2 + r_i^2 r_o^2 \frac{p_o - p_i}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2.27)$$

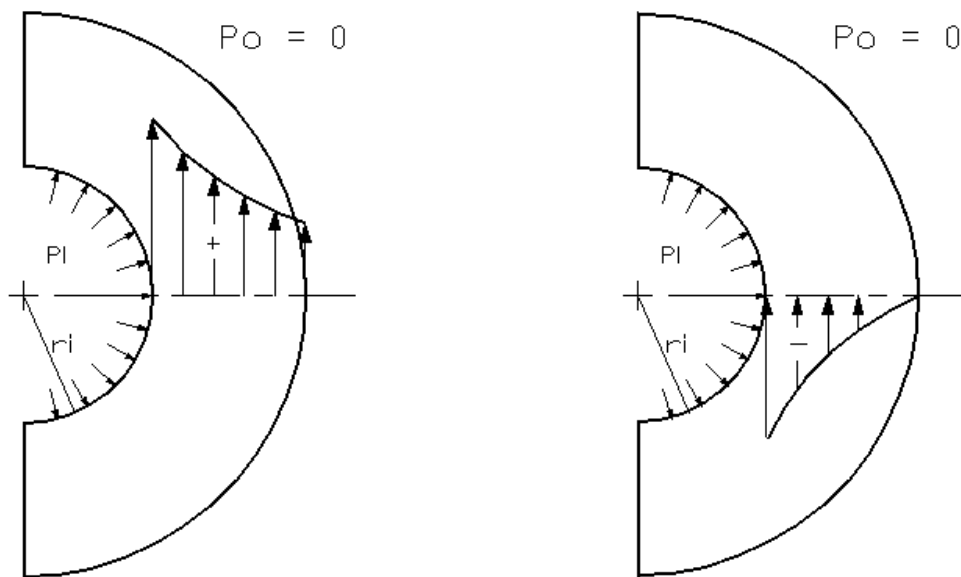


Figura 2.36 Distribución del esfuerzo tangencial y radial para un cilindro de pared gruesa que se somete a presión interna [2.36]

Se debe considerar que existen esfuerzos longitudinales cuando el propio recipiente a presión toma las reacciones en los extremos debidas a la presión interna. Este esfuerzo resulta ser:

$$\sigma_l = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2.28)$$

2.9. FENÓMENOS TÉRMICOS Y DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN

Para realizar el proceso de extrusión de plástico reciclado más fibras, se debe lograr que este, pase, de un estado sólido a uno líquido, para lograr esto se debe elevar la temperatura a lo largo del tornillo de extrusión y del molde, la temperatura, tanto del tornillo como del molde, es elevada mediante calefactores, que distribuyen de manera uniforme la temperatura. Por esta razón es que en el diseño del molde, se debe analizar detenidamente que fenómenos térmicos son los que van a actuar y que implicaciones van a tener sobre el molde.

Los fenómenos térmicos y los problemas que se generarán sobre el molde, debido a los calefactores externos, y al fluido plástico que circulará por el interior del mismo son.

2.9.1. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

La conducción del calor es una forma de transferencia de calor y este proceso solo puede darse cuando hay contacto entre un cuerpo de mayor calor con uno de menor calor. Y sucede en el contacto directo entre los objetos.

El principal parámetro dependiente del material que regula la conducción de calor en los materiales es la conductividad térmica, una propiedad física que mide la capacidad de conducción de calor o capacidad de una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otras sustancias con las que está en contacto. La inversa de la conductividad térmica es la resistividad térmica, que es la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor. La transferencia de calor por conducción térmica se dará desde los calefactores hacia el molde y desde el molde hacia el fluido.

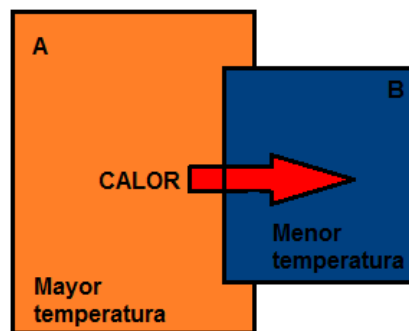


Figura 2.37 Transferencia de calor por conducción

Tabla 2.19 Conductividad térmica para ciertos materiales ^[2.19]

Metal	Conductividad térmica K (W/m·K)
Aluminio	209,3
Acero	45 - 58
Cobre	389,6
Latón	85,5
Madera	0,13
Mármol	2,09
Plásticos	0,15 – 0,5
PE	0,32 – 0,4
Aire	0,05

2.9.2. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Esta transferencia de calor se da por medio de los líquidos y gases; cuando se produce movimiento en estos fluidos se transfiere el calor de una parte del fluido a otra gracias a la convección.

En los líquidos y gases el movimiento puede ser natural o forzado:

- La convección natural se da cuando en el fluido hay una temperatura uniforme
- La convección forzada se realiza cuando se somete un fluido a una gradiente de presiones con este proceso se forzó su movimiento. De acuerdo a las leyes de los fluidos en movimiento.

Un ejemplo puede ser al momento de calentar una caldera, se le aplica fuego y el fluido que tiene dentro tiende a cambiar su temperatura, empieza a moverse el líquido porque lo más caliente tiende a subir y lo de arriba a bajar haciendo un movimiento por convección.

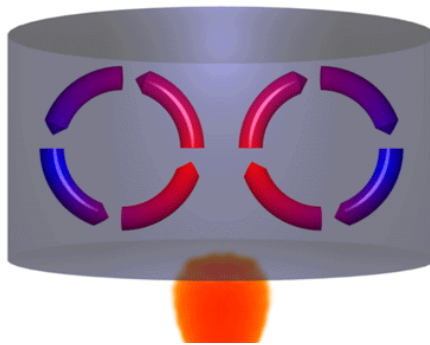


Figura 2.38 Transferencia de calor por convección

2.9.3. DEFORMACIÓN QUE CAUSAN LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA

Los elementos de máquinas cuando están en funcionamiento sufren cambios de temperatura que provocan deformaciones en estos productos de estos diferenciales de temperatura.

Algunos ejemplos de ellos: Las piezas de los motores, hornos, maquinas herramientas (fresadoras, tornos, cortadoras), equipos de moldeo y extrusión de plástico. Los diferentes materiales cambian de dimensiones a diferente tasa cuando se exponen a cambios de temperaturas.

La mayoría de los metales se dilatan al aumentar la temperatura, aunque algunos se contraen y otros permanecen del mismo tamaño. Estos cambios de dimensiones están determinados por el coeficiente de expansión térmica. El coeficiente de expansión térmica (α) es la propiedad de un material que indica la cantidad de cambio unitario dimensional con un cambio unitario de temperatura, sus unidades con $^{\circ}\text{F}^{-1}$ y $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

2.9.4. EXPANSIÓN TÉRMICA

Son las variaciones de dimensión de un material producto de los cambios de temperatura en el mismo. Y la ecuación es la siguiente es la siguiente:

$$\delta_T = \alpha L_o \Delta T \quad (2.29)$$

Donde:

δ_T : Expansión Térmica

α : Coeficiente de Expansión Térmica

L_o : Longitud inicial del miembro

ΔT : Cambio de temperatura

Los valores de coeficientes de expansión térmica para seleccionados compuestos, metales, vidrios, madera, concreto y plástico se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2.20 Coeficientes de expansión térmica, $\times 10^{-6}$ [2.20]

MATERIAL	Longitudinal		Transversal	
	$^{\circ}\text{F}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	$^{\circ}\text{F}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Vidrio / fibras epóxicas unidireccionales	3.50	6.30	11.00	19.80
Aramida / fibras epóxicas unidireccionales	-1.10	-1.98	38.00	68.40
Carbón / fibras epóxicas unidireccionales	0.05	0.09	9.00	16.20
Carbón / fibras epóxicas cuasi - direccionales	1.60	2.88	1.60	2.88

Tabla 2.21 Coeficientes de expansión térmica para metales, $\times 10^{-6}$ [2.21]

MATERIAL	$^{\circ}\text{F}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Acero AISI 1020	6.5	11.7
Acero AISI 1040	6.3	11.3
Acero AISI 4140	6.2	11.2
Acero estructural	6.5	11.7
Hierro fundido gris	6.0	10.8
Acero inoxidable AISI 301	9.4	16.9
Acero inoxidable AISI 430	5.8	10.4
Acero inoxidable AISI 501	6.2	11.2
Aleación de aluminio 2014	12.8	23.0
Aleación de aluminio 6061	13.0	23.4
Latón C36000	11.4	20.5

Bronce C22000	10.2	18.4
Cobre C14500	9.9	17.8
Magnesio AST AZ63A-T6	14.0	25.2
Titanio Ti – 6A1 – 4V	5.3	9.5
Vidrio cilindrado	5.0	9.0
Madera (pino)	3.0	5.4
Concreto	6.0	10.8

Tabla 2.22 Coeficientes de expansión térmica para plásticos, x 10⁻⁶ [2.22]

MATERIAL	°F⁻¹	°C⁻¹
ABS resina sin relleno	53.0	95.4
ABS relleno de fibra de vidrio	16.0	28.8
Acetal resina sin relleno	45.0	81.0
Acetal relleno de fibra de vidrio	22.0	39.6
Polycarbonato resina sin relleno	37.0	66.6
Polycarbonato relleno de fibra de vidrio	13.0	23.4
Poliéster resina sin relleno	53.0	95.4
Poliéster relleno de fibra de vidrio	12.0	21.6
Poliestireno sin relleno	36.0	64.8
Poliestireno relleno de fibra de vidrio	19.0	34.2
Nylon 6 / 6 resina sin relleno	45.0	81.0
Nylon 6 / 6 relleno de fibra de vidrio	13.0	23.4

2.9.5. ESFUERZO TÉRMICO

Estos esfuerzos se generan cuando a un elemento sometido a cambios de temperaturas se le sujetan de tal modo que impiden la deformación del mismo, esto generan que aparezcan esfuerzos la pieza. Recordando que:

$$\varepsilon = \frac{\delta l}{l_0} = \frac{\alpha l_0 \Delta T}{l_0} \quad (2.30)$$

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \quad (2.31)$$

Por la Ley de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.32)$$

$$\sigma = E(\alpha \Delta T) \quad (2.33)$$

2.9.6. CONTRACCIÓN Y DEFORMACIÓN

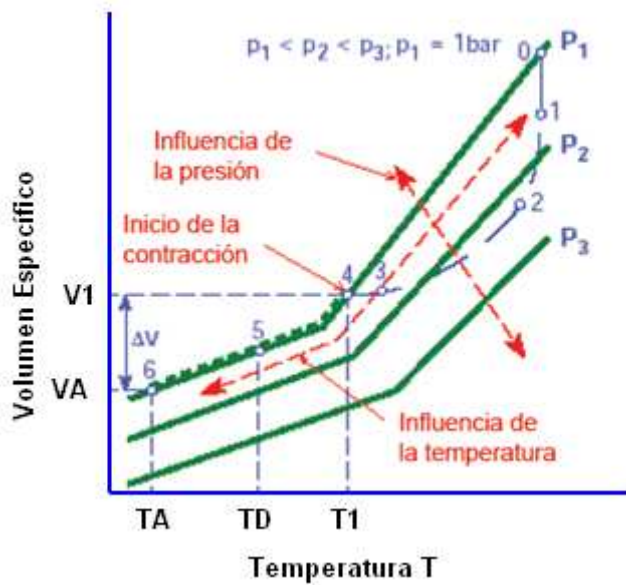
La contracción es el cambio de volumen que sufre una pieza cuando se enfría una vez transformada, para el propósito de la tesis es cuando se enfría después del proceso de extrusión mientras que la deformación se va producir en el cambio de forma de una pieza cuando se enfría una vez transformada; estos parámetros deben tomarse en cuenta en las dimensiones del molde y para la estimación de la contracción de la pieza.

2.9.6.1. Origen de la contracción

La contracción térmica no está solo relacionada con la dilatación térmica sino que intervienen otros mecanismos:

- Solidificación/cristalización del polímero
 - Velocidad de enfriamiento
 - Temperatura del molde
- Tensiones internas
- Restricciones del molde
- Termodinámica del proceso

La contracción final de la pieza es menor que la derivada de su dilatación térmica.



- 0-1 Llenado volumétrico
- 1-2 Compresión
- 2-3 Presión de mantenimiento
- 3-4 Eliminación de presión
- 4-5 Enfriamiento de desmoldeo
- Enfriamiento al ambiente

Figura 2.39 $E_{\text{especifico}} - \text{Temperatura}$ [2.39]

2.9.6.2. Estimación de la contracción

2.9.6.2.1. Contracción volumétrica

$$S_V = \frac{V_C - V_P}{V_C} \quad (2.34)$$

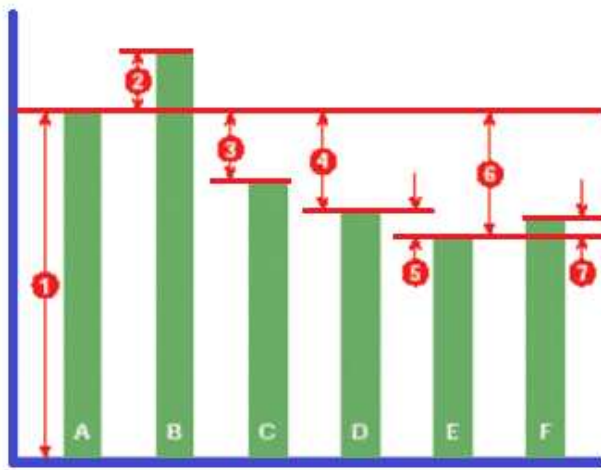
- V_C : Volumen de la cavidad del molde
- V_P : Volumen de la pieza moldeada

$$S_V = 1 - (1 - S_L)(1 - S_W)(1 - S_S) \quad (2.35)$$

- S_L : Contracción longitudinal
- S_W : Contracción transversal
- S_S : Contracción del espesor

2.9.6.4. Evolución de las dimensiones con el tiempo

En la transformación del polímero a través de las fases de extrusión las dimensiones de la pieza sufren variaciones como muestra la Fig. 2.41



- A: Molde frío
- B: Molde caliente
- C: Pieza desmoldeada
- D: Pieza en condiciones normales
- E: Pieza en servicio
- F: Pieza con absorción de agua

- 1: Dimensión del molde
- 2: Dilatación del molde
- 3: Contracción desmoldeo
- 4: Contracción de la pieza
- 5: Post-contracción
- 6: Contracción total

Figura 2.41 Evolución de las dimensiones con el tiempo [2.41]

2.9.6.5. Post-contracción

Es la contracción que sufre una pieza en servicio o almacenada sobre todo a temperaturas altas debido a relajación de tensiones, reorientación molecular y post-cristalización. La absorción de agua modifica las dimensiones de la pieza y se añade a la post-contracción. La Figura 2.42 muestra la variación del volumen específico al aumentar la temperatura para un termoplástico amorfo y semi-cristalino.

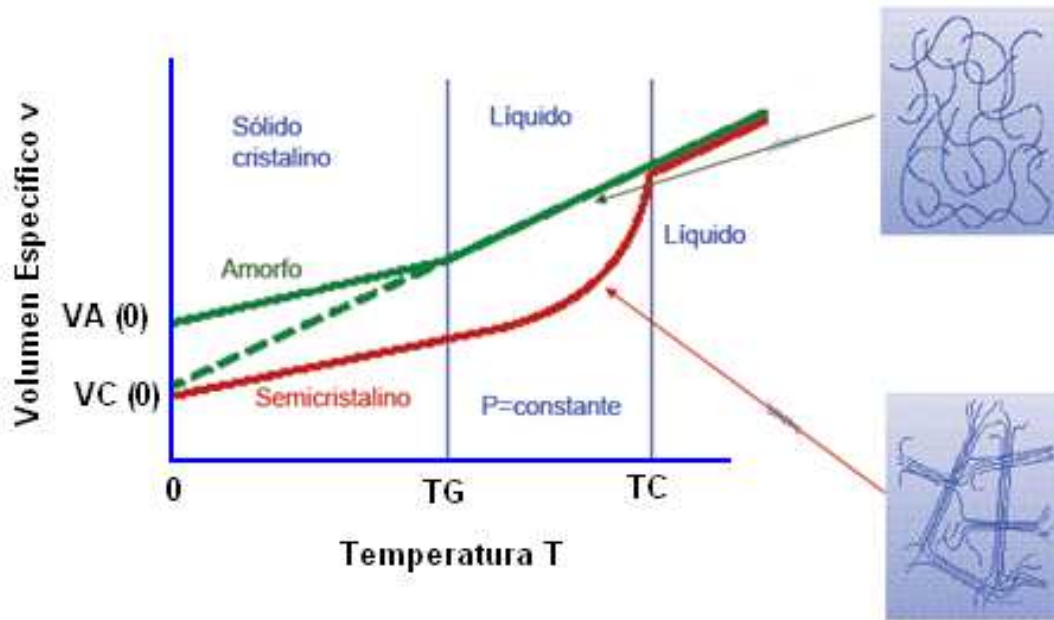


Figura 2.42 Temperatura - V_{es} para materiales amorfos y semi-cristalinos [2.42]

2.9.6.6. Cristalización

La velocidad de cristalización depende de la temperatura del molde; a bajas velocidades de cristalización se produce alta cristalización y elevada contracción mientras que a altas velocidades de cristalización se produce baja cristalización, baja contracción y elevada post-contracción

2.9.6.7. Efectos de los refuerzos

Los refuerzo de fibras impiden la contracción en la dirección de la fibra y dan lugar a una menor contracción, además la contracción en la dirección perpendicular disminuye pero en menor proporción. La Figura 2.43 muestra la tendencia de la contracción para ciertos plásticos en la dirección longitudinal y transversal.

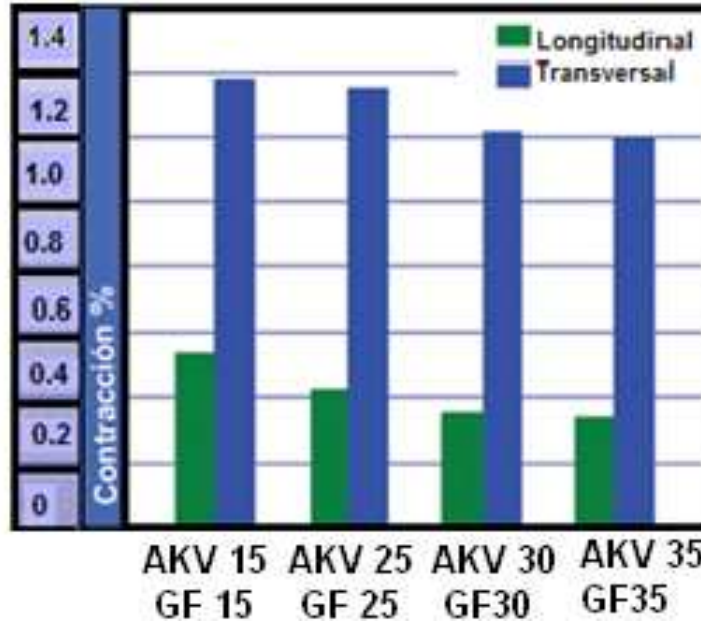


Figura 2.43 Influencia de los refuerzos de fibra ^[2.43]

2.9.6.8. Temperatura de la masa

La temperatura de la masa tiene dos efectos contrapuestos, a temperaturas altas dan lugar a una mayor dilatación térmica, por lo tanto mayor contracción y un segundo efecto que es el de reducción de la viscosidad de la masa, por consiguiente una mejor compactación lo que ocasiona una reducción de la contracción. Estos dos efectos se ven representados en la Figura 2.44 la cual muestra en línea entrecortada la dilatación térmica y en línea continua una reducción de la viscosidad.

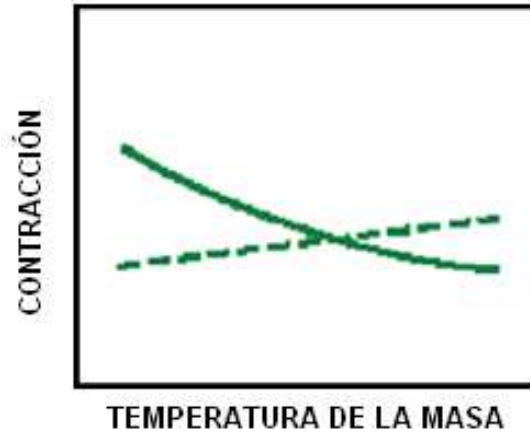


Figura 2.44 Variación de la contracción al aumentar la temperatura [2.44]

2.9.6.9. Temperatura del molde

Temperaturas del molde bajas dan lugar a velocidades de enfriamiento altas y por lo tanto, cristalizaciones y contracciones bajas, pero grandes post-contracciones como se muestra en la Figura 2.45. La contracción total final de una pieza en servicio es análoga con temperaturas del molde diferentes.

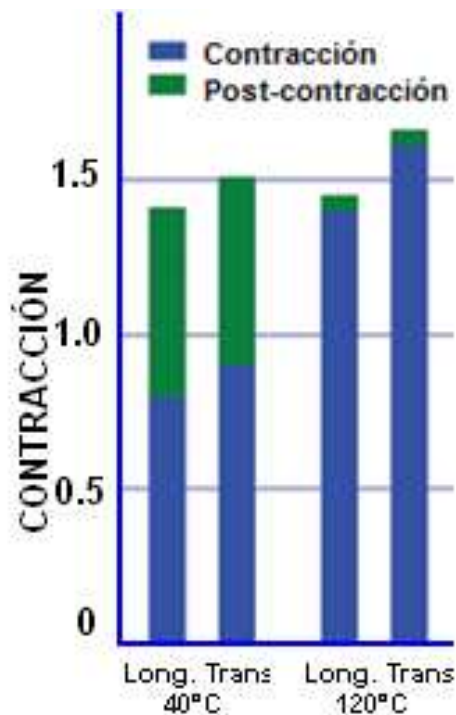


Figura 2.45 Variación de la contracción y post-contracción [2.45]

2.10. MECÁNICA DE FLUIDOS APLICADO A PLÁSTICOS

Un fluido es un cuerpo cuyas moléculas tienen escasa conexión entre sí y adoptan la forma del recipiente que los contiene. Típicamente, los líquidos son considerados incompresibles, mientras que los gases son considerados compresibles. La principal diferencia en el comportamiento mecánico de fluidos comparado con el de los sólidos es que cuando un esfuerzo de corte es aplicado al fluido, éste experimenta una deformación permanente y continua. De esta manera, un fluido puede ser definido de manera precisa como un material que se deforma continua y permanentemente bajo la aplicación de un esfuerzo de corte, no importa cuán pequeño sea. Esta definición no toma en cuenta el asunto de cuán rápidamente ocurre la deformación y, como veremos más adelante, esta velocidad depende de varios factores incluyendo las propiedades del propio fluido. La imposibilidad de los fluidos de resistir el esfuerzo de corte les da la habilidad característica para cambiar su forma o fluir. Durante el flujo de fluidos reales, los esfuerzos de corte asumen un rol muy importante, y su predicción es una parte vital del trabajo de ingeniería. Sin embargo, si no hay flujo, los esfuerzos de corte no pueden existir, y el único esfuerzo presente es el esfuerzo compresivo, o presión. Los fluidos pueden clasificarse de manera general de acuerdo con la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la relación de deformación. Para realizar el estudio de la mecánica de fluidos en los plásticos, debemos de tomar en consideración un nuevo término, que es reología.

2.10.1. REOLOGÍA

La reología es la ciencia que estudia el flujo y las deformaciones de sólidos y fluidos bajo la influencia de fuerzas mecánicas. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales. Estos modelos reológicos se basan en el cálculo experimental de una serie de constantes que caracterizan el flujo para cada fluido en las variables de operación que se encuentra.

Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante reómetros, aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte).
- Coeficientes de esfuerzos normales.
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio).
- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (comportamiento viscoelástico lineal).
- Funciones complejas de viscoelasticidad no lineal.

Los estudios teóricos en reología en ocasiones emplean modelos microscópicos para explicar el comportamiento de un material. Por ejemplo en el estudio de polímeros, éstos se pueden representar como cadenas de esferas conectadas mediante enlaces rígidos o elásticos. A continuación se va a detallar una clasificación reológica de los fluidos, así como los modelos reológicos que se ajusta a cada tipo de fluido.

2.10.2. CLASIFICACIÓN REOLÓGICA

Se puede hacer una primera distinción entre fluidos con comportamiento newtoniano y no newtoniano, según obedezcan a la ley de Newton de la viscosidad o no. Para los fluidos newtonianos la función viscosidad es constante, siendo precisamente su valor el de la viscosidad newtoniana. En los fluidos no newtonianos ya no se puede hablar de la viscosidad ya que la relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación no es constante, en este caso se define la viscosidad aparente, la cual es función de la velocidad de deformación

Una segunda clasificación distingue los fluidos dependientes e independientes del tiempo. Los fluidos cuyo comportamiento solo depende del esfuerzo cortante se denominan independientes del tiempo y su viscosidad a una determinada

temperatura sólo depende de la velocidad de deformación. Los fluidos dependientes del tiempo son aquellos cuya viscosidad depende además del gradiente velocidad del tiempo que actúa dicho gradiente. Para el estudio que vamos a realizar es necesario clasificar a los fluidos según el siguiente esquema. Comportamiento independiente del tiempo:

- Fluidos newtonianos
- Fluidos no newtonianos
 - Plásticos
 - Pseudoplásticos
 - Dilatantes

2.10.3. FLUIDO NEWTONIANO

Un fluido newtoniano es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo, independiente del esfuerzo de corte al cual se somete un fluido. En este tipo de fluidos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Un gráfico de esfuerzo de corte ó viscosidad en función de la velocidad de corte se conoce como reograma como el que muestra la Figura 2.46. El reograma para un fluido Newtoniano es una línea recta cuya pendiente es la viscosidad.

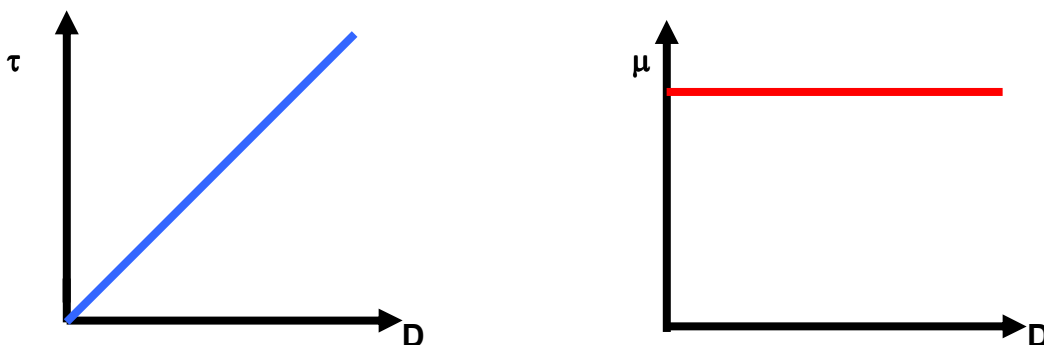


Figura 2.46 Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido newtoniano ^[2.46]

2.10.4. FLUIDO NO NEWTONIANO

El comportamiento reológico de este tipo de fluidos queda completamente caracterizado por una simple relación entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación a una determinada temperatura. Esto es debido a que la viscosidad sólo depende del gradiente de velocidad. Este grupo de fluidos engloba tres comportamientos diferenciados como muestra la Figura 2.47.

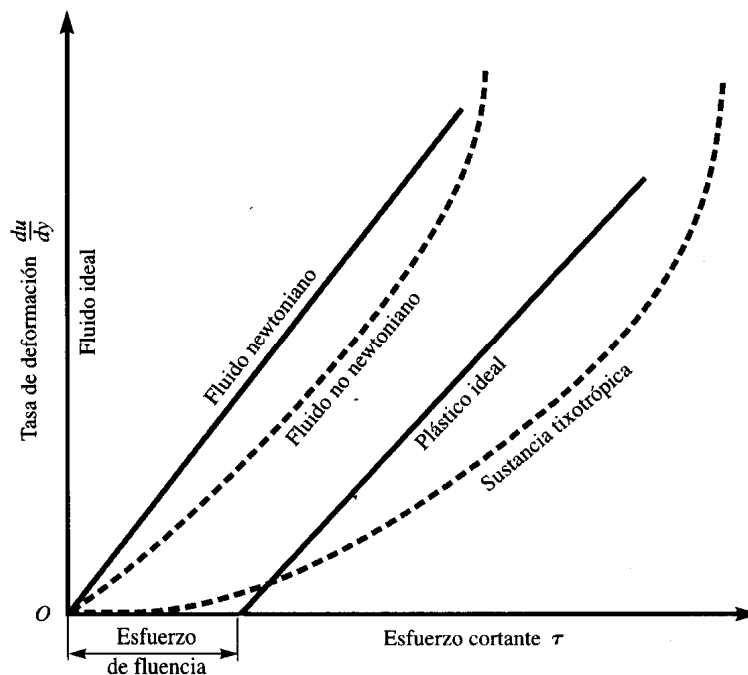


Figura 2.47 Tasa de deformación – Esfuerzo cortante en fluidos [2.47]

2.10.5. FLUIDOS PLÁSTICOS

Este tipo de fluido se comporta como un sólido hasta que sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo (esfuerzo umbral) y a partir de dicho valor se comporta como un líquido. Las curvas de fluidez y viscosidad se representan en la Figura 2.48.

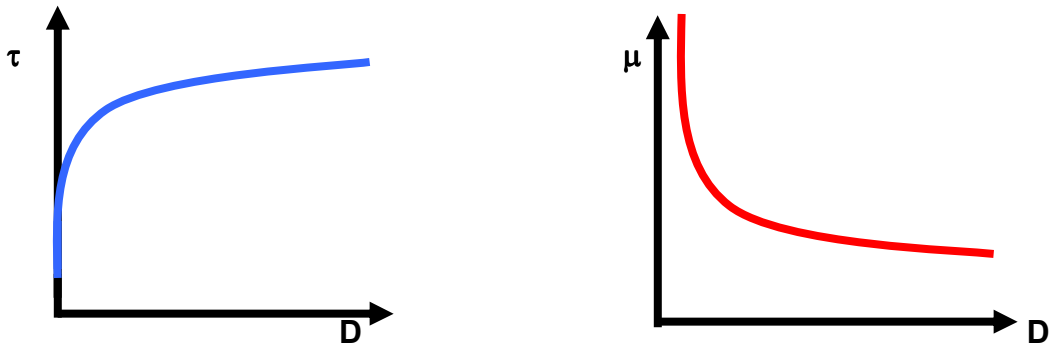


Figura 2.48 Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido plástico [2.48]

La razón por la que se comportan así los fluidos plásticos es la gran interacción existente entre las partículas suspendidas en su interior, formando una capa llamada de solvatación. Están formados por dos fases, con una fase dispersa formada por sólidos y burbujas distribuidos en una fase continua. En estos fluidos, las fuerzas de Van der Waals y los puentes de hidrógeno, producen una atracción mutua entre partículas. También aparecen fuerzas de repulsión debidas a potenciales de la misma polaridad.

En este tipo de fluidos se forman coloides cuyas fuerzas repulsivas tienden a formar estructuras de tipo gel. Si las partículas son muy pequeñas poseen entonces una gran superficie específica, rodeados de una *capa de adsorción* formada por moléculas de fase continua. Gracias a esta capa, las partículas inmovilizan gran cantidad de fase continua hasta que no se apliquen sobre ellas un esfuerzo cortante determinado.

Los fluidos plásticos, a su vez, se diferencian en la existencia de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, a partir de su esfuerzo umbral. Si existe proporcionalidad, se denominan fluidos plásticos de Bingham y si no la hay, se denominan solo plásticos.

2.10.6. FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS

En este tipo de fluidos la viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de deformación. Los fluidos que presentan este tipo de comportamiento se caracterizan por tener partículas de forma irregular dispersas en la fase líquida. En reposo estas partículas se encuentran desordenadas, lo cual origina una gran resistencia interna al flujo. A medida que aumenta la velocidad de deformación, las partículas se orientan en la dirección del flujo disminuyendo así la resistencia al deslizamiento y por lo tanto también disminuye la viscosidad como muestra la Figura 2.49. Este tipo de comportamiento es muy usual en los fluidos alimentarios.

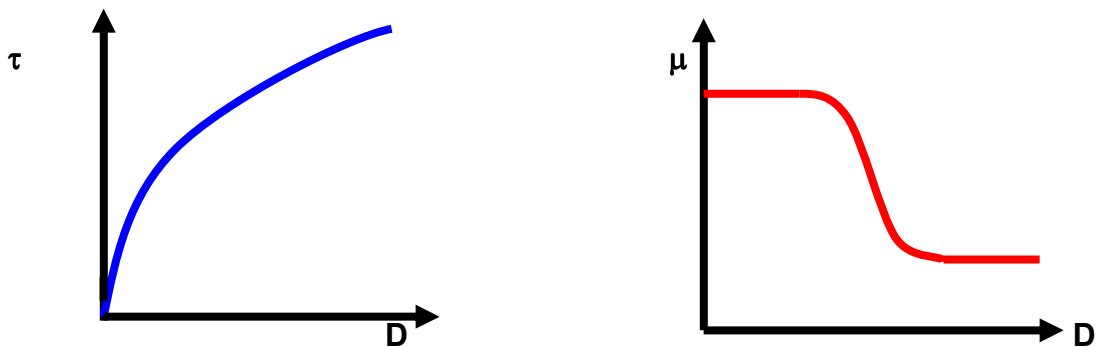


Figura 2.49 Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido pseudoplásticos ^[2.49]

2.10.7. FLUIDOS DILATANTES

En este tipo de fluidos su viscosidad aparente aumenta al hacerlo la velocidad de deformación. Estos fluidos se someten a gradientes bajos de velocidad, las partículas están suficientemente empaquetadas para que el líquido llene los huecos entre partículas actuando como lubricante y haciendo por lo tanto, que la viscosidad sea baja.

Al aumentar la velocidad aumentan los huecos y no hay suficiente líquido para lubricar el roce de las partículas aumentando por lo tanto, la viscosidad aparente. Este es un comportamiento que se observa muy raramente.

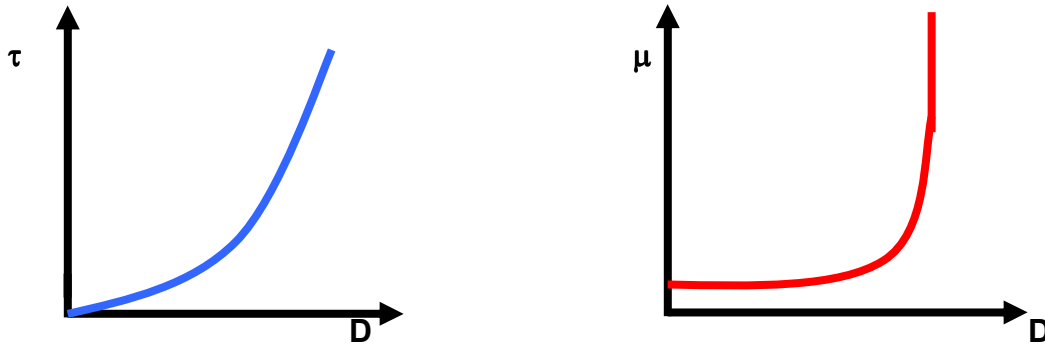


Figura 2.50 Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido dilatante [2.50]

2.10.8. MODELOS REOLÓGICOS PARA FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Las ecuaciones que modelan el comportamiento de los fluidos plásticos son dos:

2.10.8.1. Ecuación generalizada de Bingham

Este es un modelo utilizado para describir el comportamiento plástico, en él aparece un umbral de fluencia que debe superarse para que el plástico empiece a fluir

Se aplica a los fluidos plásticos de Bingham:

$$\tau - \tau_y = \mu |D|^{n-1} \cdot D \quad (2.39)$$

Donde:

- τ : Esfuerzo cortante (Pa)

- τ_y : Esfuerzo umbral requerido para que el flujo se ponga en movimiento (Pa); representa el valor del esfuerzo cortante para velocidad de deformación nula
- μ : Viscosidad aparente (Pa·s)
- D: Velocidad de deformación (s^{-1})
- n: Valor entero

2.10.8.2. Ecuación de Casson

Este modelo se utiliza para calcular los valores del umbral de fluencia, se aplica para aquellos fluidos en los que no existe proporcionalidad entre el esfuerzo y la velocidad:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_y} + \mu_\infty \cdot \sqrt{D} \quad (2.40)$$

Donde:

- τ : Esfuerzo cortante (Pa)
- τ_y : Esfuerzo umbral (Pa)
- D: velocidad de deformación (s^{-1})
- μ : Viscosidad plástica definida por Casson

Si bien estas son las dos ecuaciones que se utilizan principalmente, para modelar un fluido plástico, no se puede olvidar que todos los fluidos se encuentran bajo la influencia de la ecuación de la continuidad y la ecuación de Bernoulli, pues ambas describen el comportamiento de un fluido en movimiento a lo largo de una línea de corriente.

2.10.8.3. Ecuación de la continuidad

Consideremos un tubo de corriente de sección recta variable como muestra la Figura 2.51; la masa del líquido que fluye debe ser la misma en todas las posiciones del tubo; si la sección recta disminuye, la velocidad de evacuación debe aumentar, y viceversa.

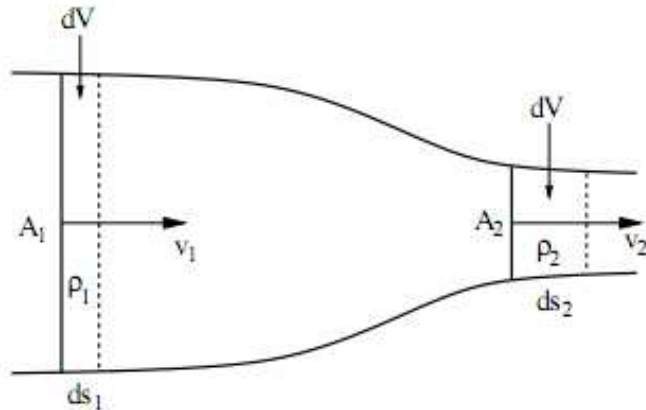


Figura 2.51 Tubo de corriente de sección recta variable ^[2.51]

Cuando el líquido se mueve una distancia ds_1 , con relación a la sección de área A_1 , una masa $A_1\rho_1 ds_1$ atraviesa A_1 y penetra en la región comprendida entre A_1 y A_2 . Las cantidades ρ_1 y ρ_2 son las densidades en A_1 y A_2 .

La masa que penetra por unidad de tiempo es:

$$A_1\rho_1 \frac{ds_1}{dt} = A_1\rho_1 v_1 \quad (2.41)$$

Si nada de fluido se pierde, la misma masa debe salir a través de A_2 .

$$A_1\rho_1 v_1 = A_2\rho_2 v_2 = \text{constante} \quad (2.42)$$

Esta es la ecuación de la continuidad. Si la densidad del líquido es constante, se tiene que:

$$A_1v_1 = A_2v_2 \quad (2.43)$$

Las velocidades a lo largo del tubo de corriente son inversamente proporcionales a la sección recta del tubo. Si definimos la función evacuación o flujo de líquido como:

$$\phi = A v = A \frac{ds}{dt} = \frac{dV}{dt} \quad (2.44)$$

Donde ϕ es el volumen que pasa por una superficie por unidad de tiempo, el teorema anterior nos dice que para fluido incompresibles $\phi = \text{constante}$.

2.10.8.4. Ecuación de Bernoulli

Consideremos un fluido que se encuentra inicialmente entre dos caras transversales a y c como la Figura 2.52. En un instante Δt el fluido que estaba en a se desplaza hasta b una distancia $\Delta S_1 = v_1 \Delta t$, donde v_1 es la velocidad en la cara a. análogamente, en el intervalo Δt , el fluido que estaba en c se desplaza hasta d, una distancia $\Delta S_2 = v_2 \Delta t$, donde v_2 es la velocidad en c. pensemos que A_1 y A_2 son las áreas de las caras transversales. Por la ecuación de continuidad, el volumen de fluido que pasa por cualquier cara transversal es:

$$\Delta V = A_1 \Delta S_1 = A_2 \Delta S_2 \quad (2.45)$$

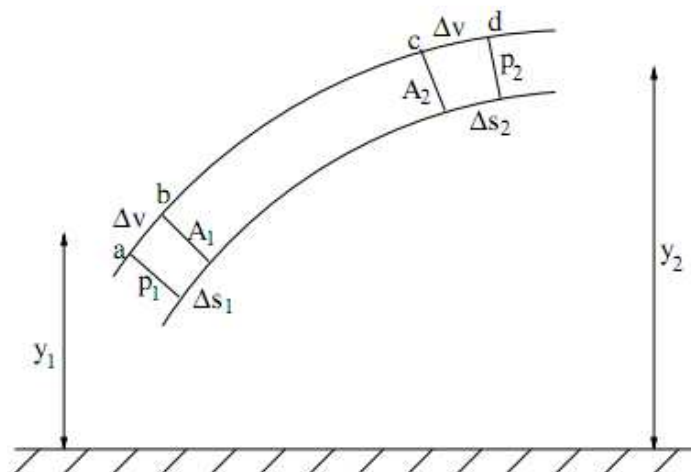


Figura 2.52 Fluido entre dos caras transversales [2.52]

Calcularemos el trabajo realizado sobre el fluido durante el tiempo Δt . La fuerza en la cara inferior es $\rho_1 A_1$, y en la cara superior es $\rho_2 A_2$ (opuesta a la dirección del desplazamiento). Por lo tanto:

$$\text{Trabajo} = W = \rho_1 A_1 \Delta S_1 - \rho_2 A_2 \Delta S_2 = (\rho_1 - \rho_2) \Delta V \quad (2.46)$$

Al principio de este tubo, el fluido entre a y b tiene volumen $A_1 \Delta S_1$, masa $\rho A_1 \Delta S_1$, y energía cinética $\frac{1}{2} \rho A_1 \Delta S_1 v_1^2$. Similarmente, el fluido entre c y d tiene energía cinética $\frac{1}{2} \rho A_2 \Delta S_2 v_2^2$. Luego, el cambio de energía cinética es:

$$\Delta K = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2) \quad (2.47)$$

La energía potencial de la masa entrante en a es $(\Delta m) g y_1 = \rho_1 \Delta V g y_1$, y la energía potencial de la masa saliente en c es $(\Delta m) g y_2 = \rho_1 \Delta V g y_2$. Luego, el cambio en energía potencial es

$$\Delta U = \rho \Delta V g (y_2 - y_1) \quad (2.48)$$

Se sabe que el trabajo es igual a la suma de las variaciones de la energía cinética y potencial, es decir, $W = \Delta K + \Delta U$, reuniendo esto con las ecuaciones anteriores tenemos.

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.49)$$

Que es equivalente a:

$$P + \rho g y + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante} \quad (2.50)$$

Esta última es la ecuación de Bernoulli

2.10.8.5. Ejemplo de cálculo

Las ecuaciones previamente señaladas nos ayudarán a determinar presiones y velocidades en determinados puntos del molde como se podrá apreciar en el siguiente ejemplo. En una tubería con disminución de área como muestra la Figura 2.53, hallar la presión en el punto 2 si ambos puntos se encuentran a la misma altura y se conoce que $A_1 = A_1$, $P_1 = P_1$, $v_1 = v_1$ y $A_2 = A_2$.

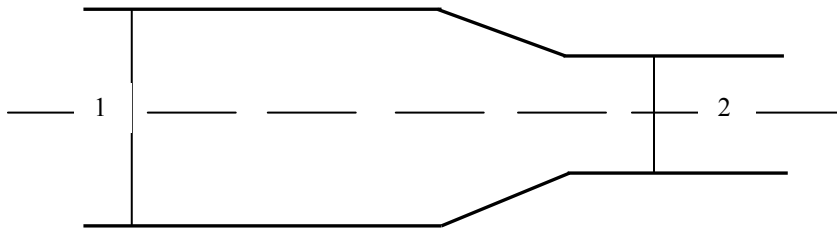


Figura 2.53 Tubería con disminución de área

Utilizando la ecuación de la continuidad tenemos

$$A_1 \rho_1 v_1 = A_2 \rho_2 v_2 \quad (2.51)$$

Al ser el mismo fluido a la misma temperatura la densidad se elimina

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2.52)$$

De esta obtenemos:

$$v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2} \quad (2.53)$$

Ahora usamos la ecuación de Bernoulli

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.54)$$

En esta conocemos que la altura a la que se encuentran los 2 puntos a ser analizados es la misma, con esto nos quedaría:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (2.55)$$

Despejando P2 obtendríamos la siguiente expresión

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 - \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2)$$

Reemplazando 1 en 2

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho \left[v_1^2 - \left(\frac{A_1 v_1}{A_2} \right)^2 \right] \quad (2.56)$$

Esta expresión nos servirá para hallar la presión en el punto 2.

2.11. OPERACIÓN DE SOFTWARE COSMOSWORKS Y COSMOSFLOWWORKS

2.11.1. HISTORIA

Todo empezó en 1993, cuando el fundador de SolidWorks, Jon Hirschtick, contrató a un equipo de ingenieros con la intención de crear una empresa capaz de desarrollar un software de CAD en 3D que resultase fácil de usar. Desde entonces, aquel equipo inicial se ha convertido en el principal proveedor de tecnología de CAD en 3D capaz de ofrecer a los equipos de ingenieros herramientas intuitivas y de alto rendimiento que les permitan diseñar mejores productos.

Lo lograron creando la primera tecnología de CAD en 3D capaz de ejecutarse en una plataforma Windows intuitiva sin necesitar sistemas caros de hardware y software para operar y que no costaba una fortuna. En 1995, la primera versión del software SolidWorks® estaba lista para salir al mercado. En dos meses, ya se había ganado los elogios de amplios sectores de la industria por haber establecido un nuevo estándar de facilidad de uso. Con el aumento exponencial de las ventas, Hirschtick confió al veterano en el sector de la ingeniería mecánica John McEleney la introducción de la empresa en el mercado asiático en 1996. McEleney instauró el dominio de SolidWorks en Asia y fue la punta de lanza del Programa de partners de soluciones de SolidWorks, que en la actualidad ya incluye a más de 700 partners de todo el mundo.

2.11.2. COSMOSFLOWWORKS

CosmosFloWorks es una herramienta de simulación diseñada desde su origen para los usuarios de SolidWorks que le aporta una comprensión de las piezas y los ensamblajes relacionados con el flujo de fluidos, la transferencia de calor y las fuerzas en sólidos sumergidos o circundantes.

CosmosFloWorks es increíblemente fácil de manejar; simplemente se indica el objetivo del análisis en lugar de preocuparse de criterios de convergencia numérica y número de iteraciones. Con el programa se pueden determinar los siguientes parámetros:

- Análisis de ingeniería del flujo basada en el objetivo.
- Comparación de diferentes diseños basados en análisis de flujo que utilizan configuraciones de SolidWorks y selección del diseño óptimo para la producción final.
- Un enfoque basado en asistente para establecer los problemas de flujo.
- Generación automática del volumen de flujo de acuerdo con el ensamblaje de SolidWorks. No es necesario crear un volumen de fluido como un componente diferente.
- Todos los parámetros de flujo están asociados con la geometría de SolidWorks y se actualizan automáticamente con los cambios producidos en el diseño.

2.11.3. COSMOSWORKS

COSMOS Works es un eficaz software de validación y optimización de diseños muy fácil de usar, totalmente integrado con el software de SolidWorks. COSMOS Works es la herramienta ideal para los ingenieros que necesitan utilidades para análisis y no están especializados en el análisis por elementos finitos. Está disponible en tres ediciones.

COSMOS Works permite mejorar la calidad de los productos identificando las áreas que son más susceptibles de errores y deficiencias. Además, podrá reducir los costes eliminando el exceso de material y minimizando la necesidad de realizar prototipos físicos. Algunas de las utilidades son:

- **Comparación diseños alternativos rápida y fácilmente**
 - **Estudios de esfuerzos, desplazamientos, deformaciones**
 - **Tipo de material, cargas, cotas geométricas**

- **Estudio de la interacción entre diferentes componentes de un ensamble**
- **Simulación de condiciones de funcionamiento reales**
- **Automatización de las tareas de análisis**

2.11.4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

- Al preparar el modelo para su análisis, COSMOSworks subdivide el modelo en pequeños tetraedros llamados elementos que comparten puntos comunes llamados nodos. La figura muestra un tetraedro típico (elemento).
- Los puntos rojos representan los nodos del elemento.
- Los elementos pueden tener aristas rectas o curvas.
- Cada nodo tiene tres incógnitas, o sea, las conversiones en las tres direcciones globales.

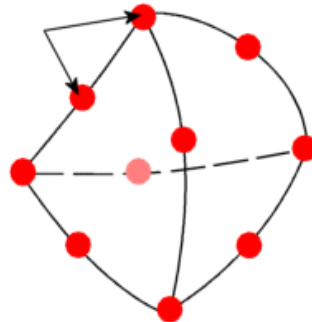


Figura 2.54 Nodos [2.54]

- El proceso de subdividir la pieza en pequeñas partes (elementos) se llama mallado. En general, cuanto más pequeño sean los elementos, más precisos serán los resultados obtenidos, pero ello requiere más tiempo y más recursos del equipo.
- COSMOSworks le recomienda un tamaño de elemento y una tolerancia globales para el mallado. El tamaño es solamente un valor promedio: es posible que los tamaños de elemento reales varíen de una ubicación a otra dependiendo de la geometría.

- Se recomienda utilizar las configuraciones de mallado predeterminadas para la ejecución inicial. Para obtener una solución más precisa, utilice un tamaño de elemento más pequeño.

COSMOSworks realiza un análisis estático lineal con las siguientes suposiciones:

2.11.5. SUPOSICIÓN DE LINEALIDAD

La respuesta inducida es directamente proporcional a las cargas aplicadas. Por ejemplo, si dobla la magnitud de las cargas, la respuesta del modelo (desplazamientos, tensiones y esfuerzos) se doblará. Puede realizar la suposición de linealidad si se cumplen las siguientes condiciones:

- El esfuerzo más alto calculado se encuentra en el intervalo lineal de la curva esfuerzo-tensión, que se caracteriza por una línea recta que empieza en el origen.
- El desplazamiento máximo calculado es considerablemente inferior a la cota característica de la pieza. Por ejemplo, el desplazamiento máximo de una chapa debe ser considerablemente inferior a su grosor, y el desplazamiento máximo de una viga debe ser considerablemente inferior a la cota más pequeña de su sección transversal.

Debe utilizar el análisis no lineal si no se cumple esta suposición.

2.11.6. SUPOSICIÓN DE ELASTICIDAD

La pieza vuelve a su forma original si se eliminan las cargas (no hay deformación permanente). Debe utilizar el análisis no lineal si no se cumple esta suposición.

2.11.7. SUPOSICIÓN ESTÁTICA

Las cargas se aplican lenta y gradualmente hasta que alcanzan sus magnitudes completas. Las cargas que se aplican repentinamente causan desplazamientos, tensiones y esfuerzos adicionales.

Debe utilizar el análisis dinámico si no se cumple esta suposición. Los resultados del análisis no son válidos si no se cumplen estas suposiciones.

COSMOSworks utiliza el criterio del esfuerzo máximo de von Mises para calcular los factores de seguridad. Este criterio manifiesta que un material dúctil empieza a ser flexible cuando el esfuerzo equivalente (esfuerzo de von Mises) alcanza el límite elástico del material. El límite elástico (SIGYLD) se define como una propiedad del material. COSMOSworks calcula el factor de seguridad en un punto dividiendo el límite elástico entre el esfuerzo equivalente en ese punto.

2.11.8. INTERPRETACIÓN DE LOS VALORES DEL FACTOR DE SEGURIDAD

- Un factor de seguridad inferior a 1.0 en una ubicación significa que el material de esa ubicación ha cedido y que el diseño no es seguro.
- Un factor de seguridad de 1.0 en una ubicación significa que el material de esa ubicación ha empezado a ceder.
- Un factor de seguridad superior a 1.0 en una ubicación significa que el material de esa ubicación no ha cedido.
- El material de esa ubicación empezará a ceder si aplica nuevas cargas iguales a las actuales multiplicadas por el factor de seguridad resultante.

COSMOS Works ofrece varios criterios de errores para los materiales dúctiles y frágiles.

2.11.9. ANÁLISIS DE ESFUERZO

- Cuando las cargas se aplican a un sólido, éste intenta absorber sus efectos desarrollando fuerzas internas que, en general, varían de un punto a otro.
- Esfuerzo equivalente (también denominado "esfuerzo de von Mises"): En COSMOSworks, se puede visualizar una cantidad de esfuerzo denominado "esfuerzo equivalente" (o de von Mises). Mientras que un esfuerzo equivalente en un punto no define exclusivamente el estado del esfuerzo en ese punto, proporciona información adecuada para evaluar la seguridad del diseño para múltiples materiales dúctiles.

A diferencia de los componentes del esfuerzo, el esfuerzo equivalente no tiene dirección. Queda completamente definido por la magnitud con las unidades del esfuerzo. Para calcular los factores de seguridad en diferentes puntos, COSMOSworks utiliza el Criterio de flexibilidad de von Mises, según el cual un material empieza a ser flexible en un punto cuando el esfuerzo equivalente alcanza el límite elástico del material.

Si se somete un sólido libre a un cambio de temperatura, éste se expandirá o se contraerá libremente según se lo caliente o se lo enfríe. Los cambios de temperatura ocasionan deformaciones unitarias pero no tensiones. Si se impide la expansión o la contracción libre del sólido, se inducen las tensiones. Las tensiones inducidas son equivalentes a las requeridas para deformar de manera similar un sólido libre equivalente.

Es importante incluir la contribución de los cambios de temperatura con las tensiones para los modelos restringidos. Para tener en cuenta este efecto, se necesita considerar la propiedad del coeficiente de expansión térmica del material (KX). Necesita especificar la temperatura de referencia asociada a la condición libre de tensión.

El programa usa las temperaturas obtenidas con dos fines:

- Carga térmica
- Propiedades de los materiales dependientes de la temperatura para cada elemento, en los cuales la temperatura de cada elemento se calcula promediando las temperaturas de sus nodos.

Para obtener correctamente las cargas de temperatura y presión desde CosmosFloWorks, el estudio activo y el estudio de CosmosFloWorks deberían estar asociados con la misma configuración de SolidWorks.

2.11.10. ANÁLISIS DE TENSION TÉRMICA

Los cambios de temperatura pueden provocar deformaciones, deformaciones unitarias y tensiones sustanciales. El análisis de tensión térmica se refiere al análisis estático que incluye el efecto de la temperatura. COSMOS Works le permite realizar el análisis de tensión térmica utilizando una de las siguientes opciones:

- Utilizar un aumento o disminución uniforme de temperatura en todo el modelo.
- Utilizar un perfil de temperatura originado de un análisis de estado estable o un análisis térmico transitorio.
- Utilizar un perfil de temperatura de CosmosFloWorks.
- Utilizar un perfil de temperatura especificado directamente prescribiendo valores de temperatura a componentes, caras y vértices en el estudio estático. Esta opción no resulta práctica en la mayoría de los casos, ya que se supone que la temperatura es de cero en otras ubicaciones. Quizás necesite solucionar un estudio teórico primero y luego utilizar los resultados para calcular las tensiones térmicas.

La pestaña Incluir efectos térmicos/de fluidos en el cuadro de diálogo Estático controla la inclusión de efectos térmicos para estudios estáticos. Si define propiedades de material manualmente, debe definir el coeficiente de expansión térmica de cada material en el modelo.

Si se somete un sólido libre a un cambio de temperatura, éste se expandirá o se contraerá libremente según se lo caliente o se lo enfríe. Los cambios de temperatura ocasionan deformaciones unitarias pero no tensiones. Si se impide la expansión o la contracción libre del sólido, se inducen las tensiones. Las tensiones inducidas son equivalentes a las requeridas para deformar de manera similar un sólido libre equivalente.

Es importante incluir la contribución de los cambios de temperatura con las tensiones para los modelos restringidos. Para tener en cuenta este efecto, se necesita considerar la propiedad del coeficiente de expansión térmica del material (KX). Necesita especificar la temperatura de referencia asociada a la condición libre de tensión.

El programa usa las temperaturas obtenidas con dos fines:

- Carga térmica
- Propiedades de los materiales dependientes de la temperatura para cada elemento, en los cuales la temperatura de cada elemento se calcula promediando las temperaturas de sus nodos.

Para obtener correctamente las cargas de temperatura y presión desde CosmosFloWorks, el estudio activo y el estudio de CosmosFloWorks deberían estar asociados con la misma configuración de SolidWorks.

En la pestaña Efectos térmicos/de fluidos, establezca las siguientes opciones:

2.11.11. OPCIONES TÉRMICAS

Seleccione una de las opciones siguientes:

- Introducir temperatura. Tiene en cuenta las temperaturas prescritas definidas para el modelo.

NOTA: Al utilizar esta opción, asegúrese de especificar las temperaturas en componentes o en vaciados. Quizás no resulte práctico especificar temperaturas solamente en los contornos, dado que se presume que existe una temperatura de cero en las demás ubicaciones. Si define temperaturas sólo en los contornos, es posible que necesite crear y resolver un estudio térmico antes de calcular las temperaturas en todos los nodos.

- Temperaturas del estudio térmico. Lee los valores de temperatura desde un estudio térmico. Seleccione un Estudio térmico y el número de Paso de tiempo (para un estudio térmico transitorio). Las mallas de estudios térmicos y estáticos deben ser idénticas.
- Temperaturas de CosmosFloWorks. Lee los valores de temperatura provenientes de un CosmosFloWorks completo en la misma configuración de un archivo. Seleccione el archivo de resultados (*.fld) deseado generado por CosmosFloWorks. Se visualiza el nombre del modelo de SolidWorks, el nombre de la configuración y el número de pasos de tiempo asociados con el archivo especificado.

Temperatura de referencia para deformación nula. Establece la temperatura en la cual no existen deformaciones unitarias en el modelo.

2.11.12. OPCIONES DE PRESIÓN DE FLUIDOS

Incluir los efectos de la presión de fluidos desde CosmosFloWorks es fácil pero se debe indicar si es una presión estática, dinámica o la presión total a la entrada y salida; esta presión va a permitir determinar una distribución de presiones a lo largo de la cavidad. Las condiciones del tipo de fluido y temperatura van a incidir directamente en la distribución representada por colores. También se pueden obtener con este análisis velocidad, vorticidad, temperatura, fracción de masa y los trazados de la sección se pueden mover dinámicamente.

Con la herramienta de identificar valores se puede saber el cálculo para los resultados en cualquier ubicación; además de graficas que muestren la variación de resultados junto con el croquis.

Se puede realizar un examen de la trayectoria del flujo dentro o alrededor del modelo con bandas animadas, flechas en 3D o esferas.

2.11.13. PARA ESTUDIOS NO LINEALES

Al considerar los efectos térmicos y de fluidos en un estudio no lineal, tenga en cuenta las siguientes diferencias:

- Si obtiene un perfil de temperatura único o un perfil de presión de CosmosFloWorks, el programa lo asocia automáticamente con una curva lineal predeterminada. El perfil de temperatura varía linealmente hasta que alcanza los valores obtenidos en el final del período de solución.
- Si selecciona un estudio térmico transitorio tiene dos opciones:
 - Especificar un paso de tiempo determinado para obtener las temperaturas. Las temperaturas se aplican linealmente según lo especificado por los parámetros de tiempo de solución.
 - Para cada paso no lineal, utilice la temperatura del tiempo correspondiente de análisis térmico transitorio

Las mallas de estudios térmicos y no lineales deben ser idénticas. Para que esta funcionalidad trabaje correctamente, el intervalo de tiempo para la solución debería ser similar para los estudios térmicos y los estudios no lineales. La utilización de un intervalo de tiempo diferente para el estudio no lineal puede conducir a resultados incorrectos.

REFERENCIAS

FIGURAS

- 2.1 proyectoecologistacmea.blogspot.com
- 2.2 es.wikiversity.org/wiki/termoplásticos
- 2.3 es.wikiversity.org/wiki/termoplásticos
- 2.4 es.wikiversity.org/wiki/diseño_de_un_extrusor
- 2.6 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.7 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.8 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.9 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.10 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.11 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.12 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.15 www.taringa.net/post/casas_con_diseño
- 2.16 www.taringa.net/post/casas_con_diseño
- 2.17 www.plastech.pl
- 2.18 www.axxocol.com
- 2.19 Catálogo Bohler 2009
- 2.20 Catálogo Bohler 2009
- 2.21 Catálogo Bohler 2009
- 2.22 Catálogo Bohler 2009
- 2.23 Catálogo Bohler 2009
- 2.24 Catálogo Bohler 2009
- 2.25 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.26 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.27 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.28 www.venezuelaenplastico.com
- 2.29 www.venezuelaenplastico.com
- 2.30 www.venezuelaenplastico.com
- 2.31 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).

- 2.32 http://capitulo6_2extrusion.pdf
- 2.33 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.34 Charles R. Mischke y Joseph E. Shigley. Diseño en ingeniería mecánica. Editorial McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A de C.V.
- 2.35 Charles R. Mischke y Joseph E. Shigley. Diseño en ingeniería mecánica. Editorial McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A de C.V.
- 2.36 Charles R. Mischke y Joseph E. Shigley. Diseño en ingeniería mecánica. Editorial McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A de C.V.
- 2.39 138.100.80.137/wikifab/images
- 2.40 138.100.80.137/wikifab/images
- 2.41 138.100.80.137/wikifab/images
- 2.42 138.100.80.137/wikifab/images
- 2.43 138.100.80.137/wikifab/images
- 2.44 138.100.80.137/wikifab/images
- 2.45 138.100.80.137/wikifab/images
- 2.46 www.itescam.edu.mx/principal/sylabus
- 2.47 html.rincondelvago.com/mecanica-de-fluidos_11.html
- 2.48 www.itescam.edu.mx/principal/sylabus
- 2.49 www.itescam.edu.mx/principal/sylabus
- 2.50 www.itescam.edu.mx/principal/sylabus
- 2.51 Frank. White. Mecánica de fluidos. Editorial Mc Graw Hill, España (2004)
- 2.52 Frank. White. Mecánica de fluidos. Editorial Mc Graw Hill, España (2004)
- 2.54 Tutorial SolidWorks

TABLAS

- 2.1 www.monografias.com/trabajos32/plastico
- 2.2 www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/propiedades
- 2.3 www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/propiedades
- 2.4 Morton, Jones. Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa, México (2004).
- 2.5 Marcelo Antúnez, procesos plásticos
- 2.6 www.axxocol.com
- 2.7 www.axxocol.com
- 2.8 www.axxocol.com
- 2.9 www.axxocol.com
- 2.10 www.axxocol.com
- 2.11 www.axxocol.com
- 2.12 www.axxocol.com
- 2.13 www.axxocol.com
- 2.14 www.axxocol.com
- 2.15 www.axxocol.com
- 2.16 Catálogo Bohler 2009
- 2.17 Catálogo Bohler 2009
- 2.18 Catálogo Bohler 2009
- 2.19 Incropera, Frank P. y Dewitt David P. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ta. Edición, Prentice Hall Hispanoamericana S.A., México (1999).
- 2.20 www.virtual.unal.edu.co
- 2.21 www.virtual.unal.edu.co
- 2.22 www.virtual.unal.edu.co

CAPITULO III

SIMULACIONES

3.1. CARACTERISTICAS DE LA EXTRUSORA DEL L.M.M

Previo a realizar las simulaciones se necesita conocer algunos parámetros en función de las características de la extrusora

Partes principales de la extrusora:

- 1 Motor reductor helicoidal trifásico Leroy Somer 1.5 HP, 480 V, 60 Hz, 1680 rpm, 2.4 A, reducción 3.91



Figura 3.1 Moto-reductor

- Cadena N 40, hilo sencillo, 112 pasos – eje del moto reductor al eje motriz
- Catalinas con relación de transmisión 5.182
 - Catalina piñón: $Z_p = 11$, tipo B, N° 40 simple
 - Catalina rueda: $Z_r = 57$, tipo B-W, N° 40 simple



Figura 3.2 Sistema piñón, rueda y cadena

- Tornillo simple para polietileno:
 - Longitud = 760 mm
 - Diámetro = 27 mm
 - Angulo de hélice = 17°
 - Longitud de la zona de dosificación = 254 mm



Figura 3.3 Tornillo simple

- 6 Bandas calefactoras (5 bandas – 700 W / 1 banda – 400 W)



Figura 3.4 Bandas calefactoras

- 2 Termocuplas tipo J (Hierro – Constatan)



Figura 3.5 Termocuplas

- 2 Interruptores para mando de circuitos de calefacción

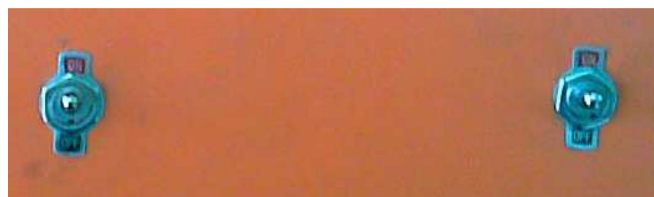


Figura 3.6 Interruptores

- 2 Controladores digitales de temperatura Camsco TC – 96N



Figura 3.7 Controladores digitales

- 1 Variador de frecuencia Danfoss Delta 2 HP



Figura 3.8 Variador de frecuencia

Modelo propuesto de operación de la extrusora

El material sólido en forma granular es depositado en la tolva del extrusor que alimenta de manera continua al husillo que gira dentro del barril estacionario a una velocidad máxima de 92 rpm. Mediante resistencias eléctricas que calientan al barril del extrusor, el material es totalmente fundido a una temperatura máxima de 180 C y transportado a una razón de flujo másico constante por el movimiento relativo del husillo respecto al barril. El polímero completamente fundido ingresa al molde de extrusión el mismo que por acción de los calefactores va tener una temperatura constante máxima de 170 C. El ingreso del polímero fundido es con un diámetro inicial de 57 mm, a partir de ese punto existe reducciones de sección a lo largo de 86 mm hasta llegar a la placa rompedora, la cual posee 7 orificios y un torpedo para mejor conducción del polímero fundido, después nos encontramos

con la boquilla que consta de dos etapas la cámara de relajación y la cámara de descarga; la primera provoca una desaceleración del material y aumenta el tiempo de residencia en la boquilla mientras que la segunda da forma y las dimensiones deseadas al polímero fundido.

3.2. SIMULACIÓN DE FLUJO PLÁSTICO

3.2.1. Teórico (Cálculo importado de Mathcad)

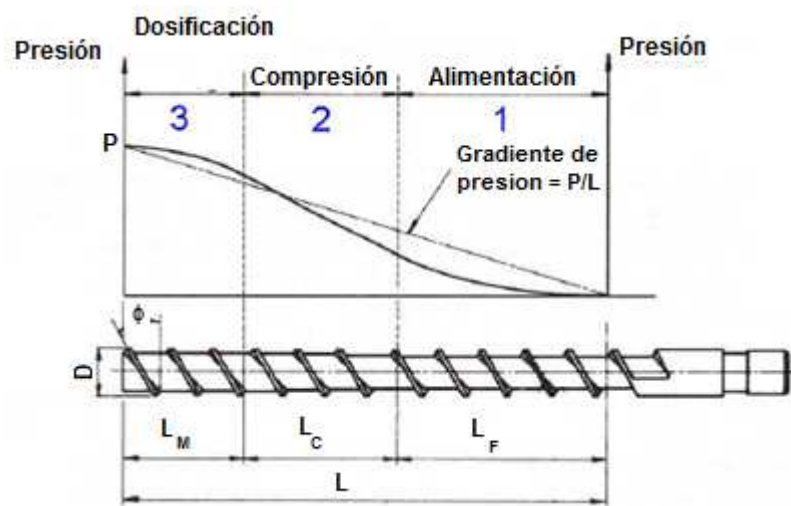


Fig. 3.9 Zonas del tornillo para el proceso de extrusión ^[3.9]

L := 770 m

Longitud total del tornillo

L := 256 m

Longitud de la zona de dosificación

m

D := 27 m

Diámetro del tornillo

φ := 17 m

Ángulo de hélice

Velocidad de giro del husillo

$$N := 92 \cdot \frac{\pi}{60 \cdot 180}$$

$$N = 0.027 \frac{r}{a_s d}$$

Profundidad de canal variable

$$h(L) := -0.0032467532 \cdot L + 5.25$$

$$S \quad L := 0 \quad h(L) = 5.25$$

$$L := 770 \quad h(L) = 2.75$$

Calculo de la constante de la boquilla

Entrada al molde

$$R_1 := 11.55 \text{ m}$$

$$L_1 := 4 \text{ m}$$

$$K_1 := \frac{\pi}{8} \cdot \frac{R_1^4}{L_1}$$

$$K_1 = 1.747 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$R_2 := 8.4 \text{ m}$$

$$L_2 := 17 \text{ m}$$

$$K_2 := \frac{\pi}{8} \cdot \frac{R_2^4}{L_2}$$

$$K_2 = 115.008 \text{ m}^3$$

$$R_3 := 16.2 \text{ m}$$

$$L_3 := 29 \text{ m}$$

$$K_3 := \frac{\pi}{8} \cdot \frac{R_3^4}{L_3}$$

$$K_3 = 932.657 \text{ m}^3$$

$$R_4 := 26.3 \text{ m}$$

$$L_4 := 9 \text{ m}$$

$$K_4 := \frac{\pi}{8} \cdot \frac{R_4^4}{L_4}$$

$$K_4 = 2.088 \times 10^4 \text{ m}^3$$

$$K_s := \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4}}$$

$$K_s = 96.269 \text{ m}^3$$

Placa rompedora y torpedo

$$R_{placa} := 4.2 \text{ m}$$

$$L_{placa} := 9.70 \text{ m}$$

$$K_{placa} := \frac{\pi}{8} \cdot \frac{R_{placa}^4}{L_{placa}}$$

$$K_{placa} = 12.598 \text{ m}^3$$

$$K_{torpedo} := \frac{7}{K_{placa}}$$

$$K_{torpedo} = 0.556 \text{ m}^3$$

Boquilla

$$R := 25.5$$

$$\frac{L}{5} := 12$$

$$K_5 := \frac{\pi}{8} \cdot \frac{R^4}{L_5}$$

$$K_5 = 1.384 \times 10^4 \text{ m}^3$$

$$R := 19.20$$

$$\frac{L}{6} := 7.60$$

$$K_6 := \frac{\pi}{8} \cdot \frac{R^4}{L_6}$$

$$K_6 = 7.022 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$R := 11.60$$

$$\frac{L}{7} := 7.60$$

$$K_7 := \frac{\pi}{8} \cdot \frac{R^4}{L_7}$$

$$K_7 = 935.574 \text{ m}^3$$

$$K_{\text{secc}} := \frac{1}{\frac{1}{K_5} + \frac{1}{K_6} + \frac{1}{K_7}}$$

$$K_{\text{secc}} = 779.092 \text{ m}^3$$

Sección rectangular

$$W := 29$$

$$a := 18$$

$$\frac{L}{8} := 6.5$$

$$K_8 := \frac{W \cdot a^3}{12 \cdot L_8}$$

$$K_8 = 2.168 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$W := 20$$

$$a := 7$$

$$\frac{L}{9} := 8$$

$$K_9 := \frac{W \cdot a^3}{12 \cdot L_9}$$

$$K_9 = 71.458 \text{ m}^3$$

$$K_{\text{secc}} := \frac{1}{\frac{1}{K_8} + \frac{1}{K_9}}$$

$$K_{\text{secc}} = 69.178 \text{ m}^3$$

$$K_{\text{total}} := \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{secc}}} + \frac{1}{K_{\text{secc}}}}$$

$$K_{\text{total}} = 9.478 \text{ m}^3$$

Sección cuadrada

$$W := 21$$

$$a := 21$$

$$L := 6.5$$

$$W := 13$$

$$a := 13$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$L := 8$$

$$K_1 := \frac{W \cdot a^3}{12 \cdot L^3} \quad K_1 = 2.493 \times 10^3 \frac{m^3}{m}$$

$$K_2 := \frac{W \cdot a^3}{42 \cdot L^4} \quad K_2 = 297.51 \frac{m^3}{m}$$

$$K_{secc} := \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}} = 265.795 \frac{m^3}{m}$$

$$K_{total} := \frac{1}{\frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_p} + \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_e}} = 10.547 \frac{m^3}{m}$$

Calculo de caudal de arrastre medio

$$F = 0.5$$

$$Q_m := \int_{514}^{770} \frac{\left(F \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N \cdot h(L) \cdot s \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot c \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right)}{n \cdot L \cdot s} dL$$

$$Q_m = 85.21 \frac{m^3}{m_s}$$

$$\rho := 0.95 \frac{g}{c^3 m}$$

Densidad del polietileno a 200 C

$$Q_a := Q_a \cdot \rho \cdot \frac{1}{1000}$$

$$Q_a = 0.081 \frac{K}{g}$$

Calculo del caudal total para rectángulo

$$\alpha := F \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N$$

$$\beta := \frac{\pi \cdot D}{12}$$

$$Q := \frac{\alpha \left(\int_{514}^{770} \frac{c \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right)}{t h (L)^2} dL \right)}{\beta + \int_{514}^{770} \frac{c \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right)^2}{c h (L)^3} dL}$$

$$Q = 83.109 \frac{m^3}{m_s}$$

$$Q_r := Q_r \cdot \rho \cdot \frac{1}{1000}$$

$$Q_r = 0.079 \frac{K}{g}$$

Calculo del caudal total para cuadrado

$$Q := \frac{\alpha \left(\int_{514}^{770} \frac{c \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right)}{t h (L)^2} dL \right)}{\beta + \int_{514}^{770} \frac{c \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right)^2}{c h (L)^3} dL}$$

$$Q = 83.109 \frac{m^3}{m_s}$$

$$Q_c = 83.172 \frac{\text{m}^3}{\text{m}_s}$$

$$Q_c := Q_c \cdot \rho \cdot \frac{1}{1000}$$

$$Q_c = 0.079 \frac{\text{K}}{\text{g}}$$

Calculo de la presión estática máxima

$$\eta := 115 \frac{\text{P} \cdot \text{s}}{\text{a}}$$

Viscosidad de polietileno de baja densidad a 150 C

$$H := 4 \text{ m}$$

$$P_{om} := \frac{6 \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot N \cdot \eta}{H^2 \cdot t \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right)}$$

$$P_{om} = 2.466 \times 10^5 \text{ P}$$

$$P_{om} := \frac{P_{om}}{1000000}$$

$$P_{om} = 0.247 \text{ M}$$

Calculo de la presión de operación

$$P_o := \frac{\left[\left(F \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N \cdot H \cdot \eta \cdot \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot c \cdot \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right) - Q_c \right] \cdot 12 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot D \cdot H^3 \cdot s \left(\phi \cdot \frac{\pi}{180} \right)^2}$$

$$P_o = 5.143 \times 10^4 \text{ P}$$

$$P_o := \frac{P_o}{1000000}$$

$$P_o = 0.051 \text{ M}$$

3.2.2. Modelado del molde

Para poder realizar un análisis de flujo en CosmosFloWorks se debe modelar las piezas que van a ser parte del ensamble del molde. Las piezas son las siguientes: cuerpo del molde, trompo, boquilla que consta de dos partes, la cámara de relajación y descarga.

Para modelar el cuerpo se utiliza el croquis que se muestra en la Fig. 3.10 Para luego utilizar la operación de revolución a 360°.

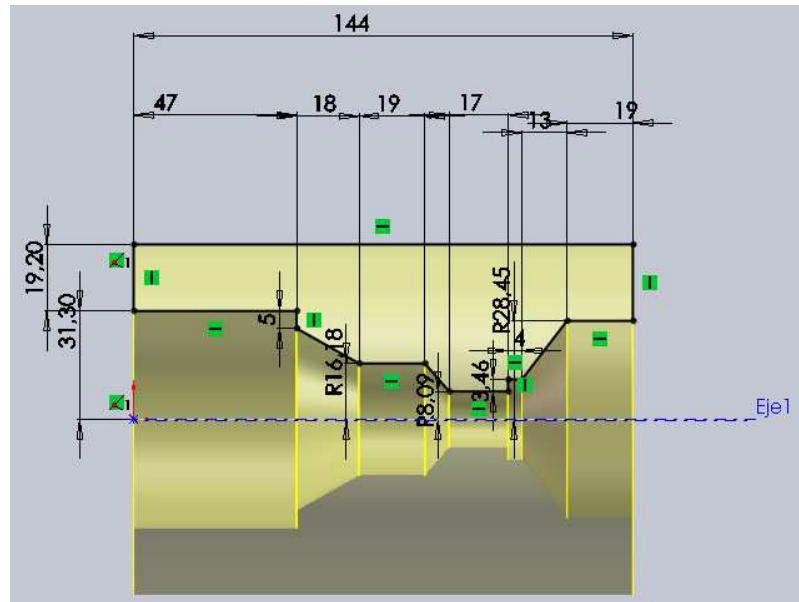


Figura 3.10 Croquis cuerpo del molde

Para modelar el trompo se crea un croquis de una circunferencia de $\Phi 62.60$ mm con 7 perforaciones de $\Phi 8.50$ mm distribuidas equidistantemente, para luego utilizar la operación de extrusión. Para hacer el cono se utilizo la operación recubrir y de simetría.

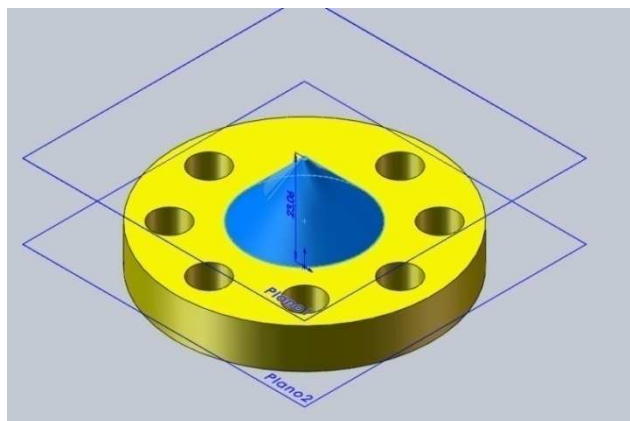


Figura 3.11 Operación de recubrir para modelar el trompo

Para modelar la cámara de relajación se crean croquis de circunferencias de diferentes diámetros y con la operación de extrusión se va creando el modelo, tomando en cuenta la opción de extrusión con ángulo de salida.

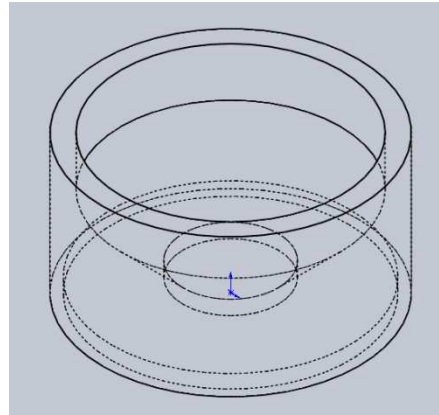


Figura 3.12 Vista de cámara de relajación con líneas ocultas visibles

Para modelar la cámara de descarga para perfil rectangular es preciso dibujar los cilindros de diferentes diámetros consecutivos donde se va a crear un croquis como se muestra en la Fig. 3.13 en la cara frontal para luego extruir a una profundidad de 8 mm.

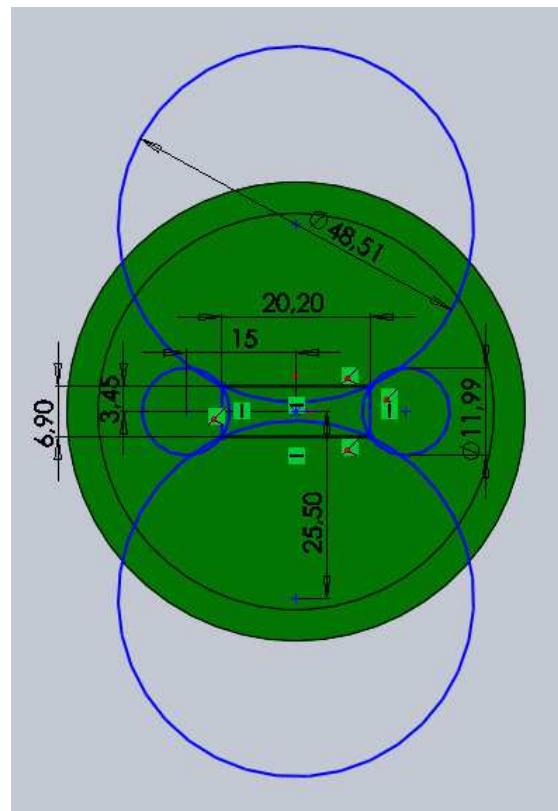


Figura 3.13 Croquis Frontal cámara de descarga molde rectangular

Mientras que para la cara posterior se hace un croquis como es que se muestra en la Fig. 3.14 para luego utilizar la operación extrusión con ángulo de salida para formar la conicidad.

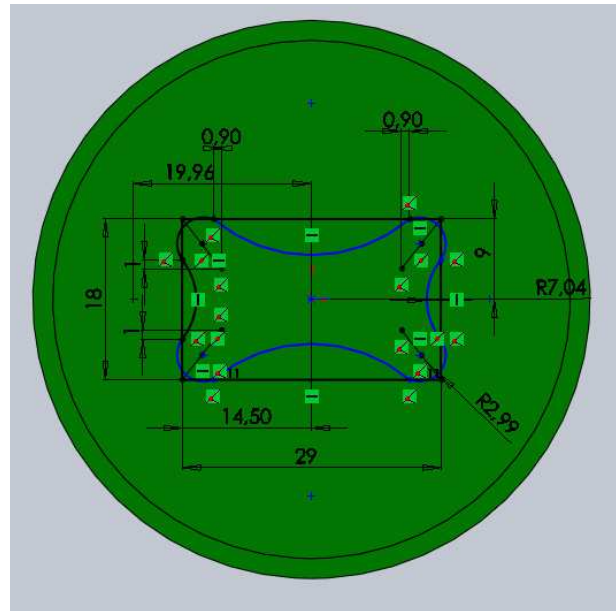


Figura 3.14 Croquis cara posterior cámara de descarga molde rectangular

Para modelar la cámara de descarga para perfil cuadrado se dibuja los cilindros consecutivos donde se va a crear un croquis como se muestra en la Fig. 3.15 en la cara frontal para luego extruir a una profundidad de 8 mm, a esa profundidad se va utilizar el mismo croquis con la operación de extruir con ángulo de salida a 26° para lograr la conicidad en la cara posterior.

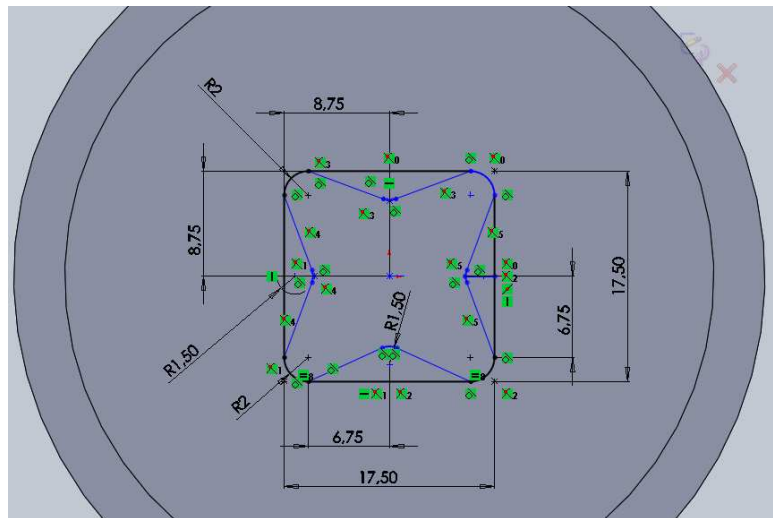


Figura 3.15 Croquis cámara de descarga molde cuadrado

Una vez dibujada las piezas se crea un ensamble con boquillas para molde rectangular y cuadrado como se muestra en la Fig. 3.16 y 3.17.

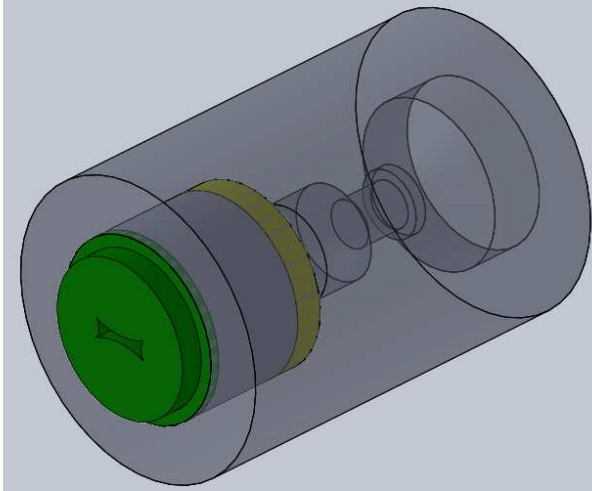


Figura 3.16 Molde rectangular

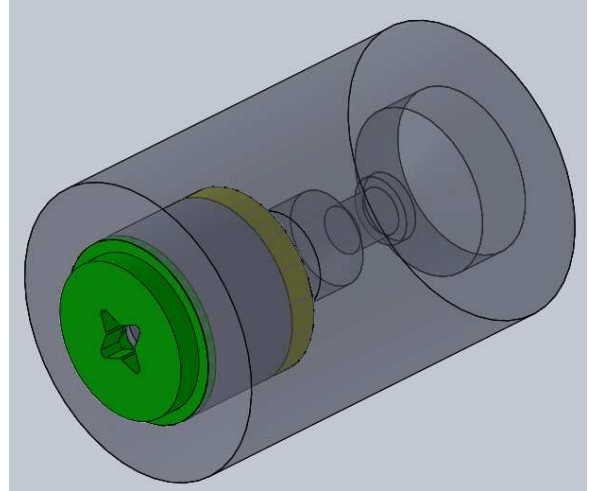


Figura 3.17 Molde cuadrado

3.2.3. Análisis de flujo utilizando CosmosFloWorks

Tanto para la simulación del perfil rectangular y cuadrado se debe crear un proyecto “*FloWorks<Project<Wizard*” en el cual se especifica el nombre del proyecto “*Simulación flujo*” y se determina el sistema de unidades que para el proyecto se escogió el SI y el tipo de análisis que tiene las siguientes características:

- Parámetros generales: Se escogió un análisis interno que no excluya las cavidades fuera de las condiciones de flujo.

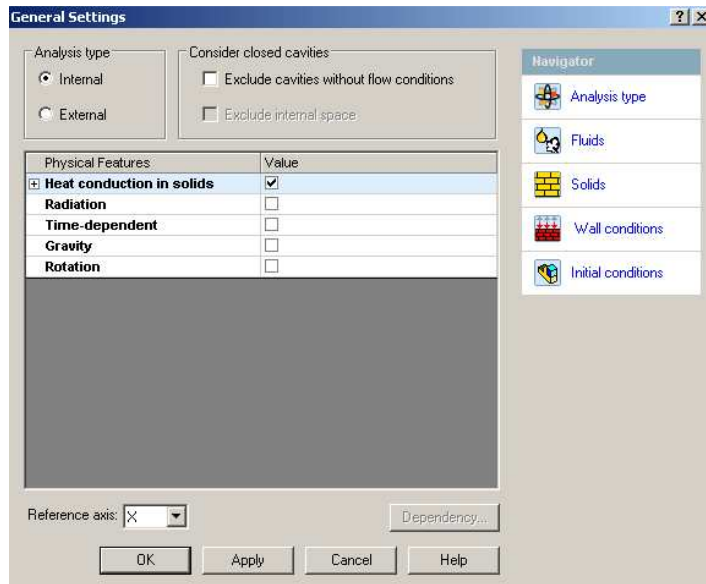


Figura 3.18 Parámetros generales CosmosFloWorks

- o Tipo de fluido: Como CosmosFloWorks no tiene plásticos para incluir como fluido, se escogió para el análisis un fluido NO newtoniano que va permitir determinar un comportamiento bastante semejante del fluido dentro del molde; además el análisis se lo hace asumiendo flujo laminar durante todo el proceso.

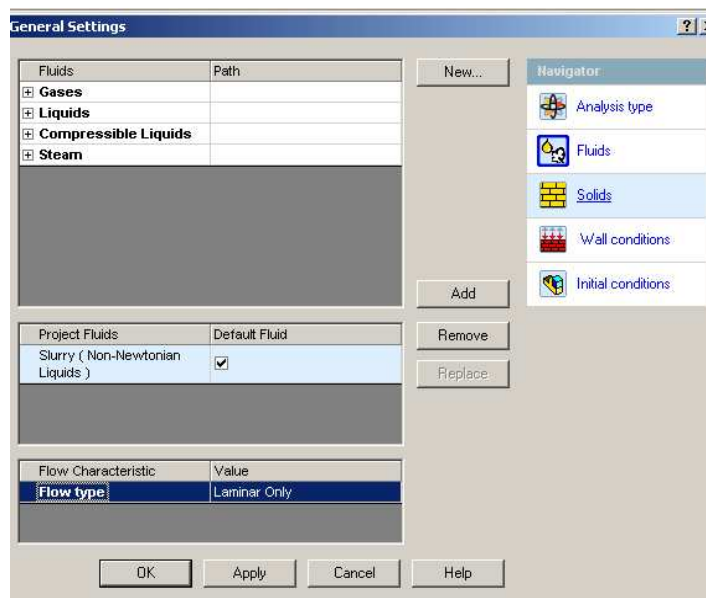


Figura 3.19 Fluido no newtoniano CosmosFloWorks

- o Material del molde: Para el análisis se escogió al acero

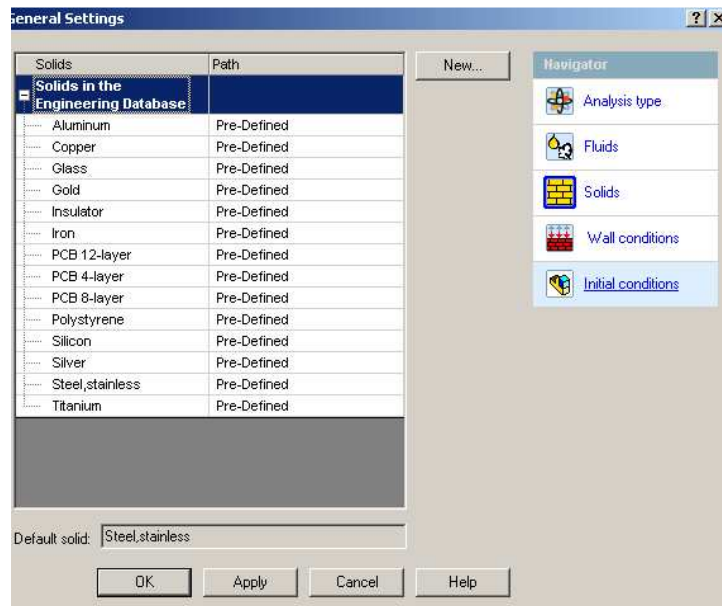


Figura 3.20 Material del molde CosmosFloWorks

- o Condiciones de borde: Como el equipo posee un resistencia de abrazadera la cual tiene un control para mantener la temperatura constante, esto permite tener una condición adiabática

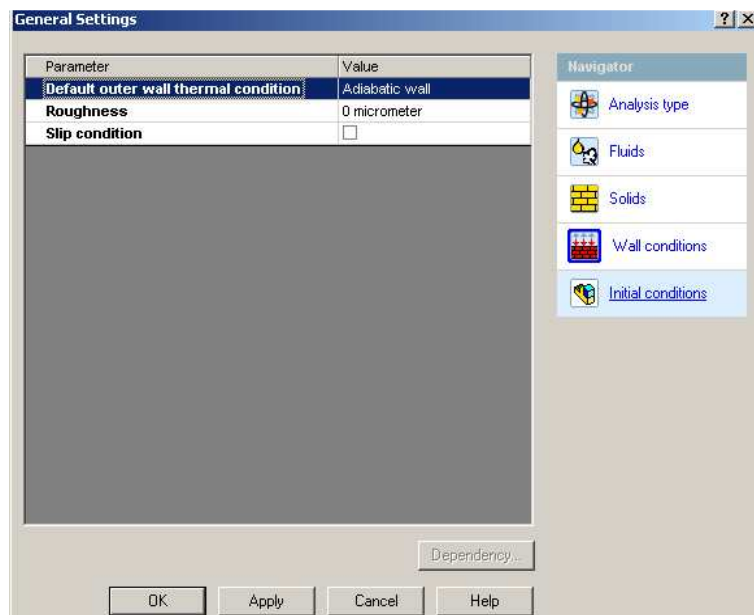


Figura 3.21 Condiciones iniciales CosmosFloWorks

- Condiciones iniciales: Para el análisis tiene una temperatura ambiente de 293 K y 101325 Pa de presión. Mientras que el sólido por estar en presencia de una resistencia le permite tener una temperatura constante máxima externa de 170 C. Esta temperatura está dada ya que el punto de fusión para el polietileno de alta y baja densidad es 135 C y 110 C respectivamente; dejando un rango de 30 a 40 C por encima a esta temperatura podemos tener la temperatura máxima en la que el material pueda fluir sin que se queme

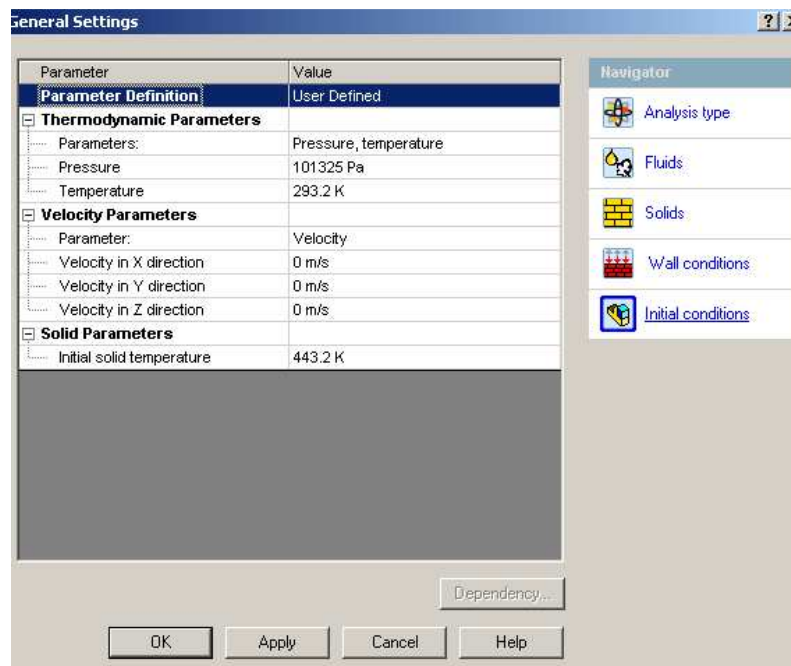


Figura 3.22 Parámetros termodinámicos CosmosFloWorks

Una vez creado el proyecto se procede a crear un dominio “FloWorks<Computational domain<Hide” tomando en cuenta que el molde debe estar completamente cerrado con tapas.

3.2.3.1. Molde rectangular

Para la entrada se toma en cuenta la condición de que a la salida del husillo en condiciones extremas se va producir una presión estática máxima (246600 Pa) dada al momento que el flujo de presión sea capaz de anular al flujo de arrastre. Para ingresar esta condición se debe ingresar en “*boundary conditions<insert<static pressure*”.

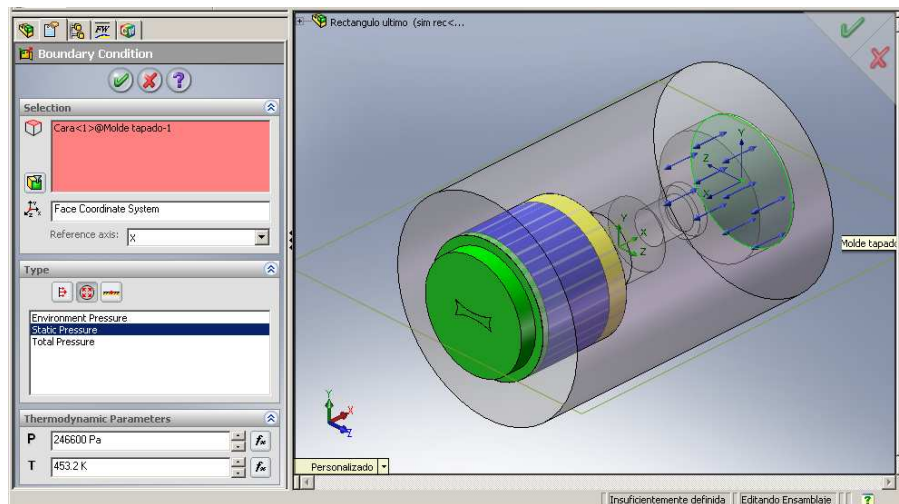


Figura 3.23 Condiciones de entrada molde rectangular

- A la salida la presión se iguala a la presión atmosférica (101325 Pa) la cual se debe ingresar en “*boundary conditions<insert<static pressure*”.

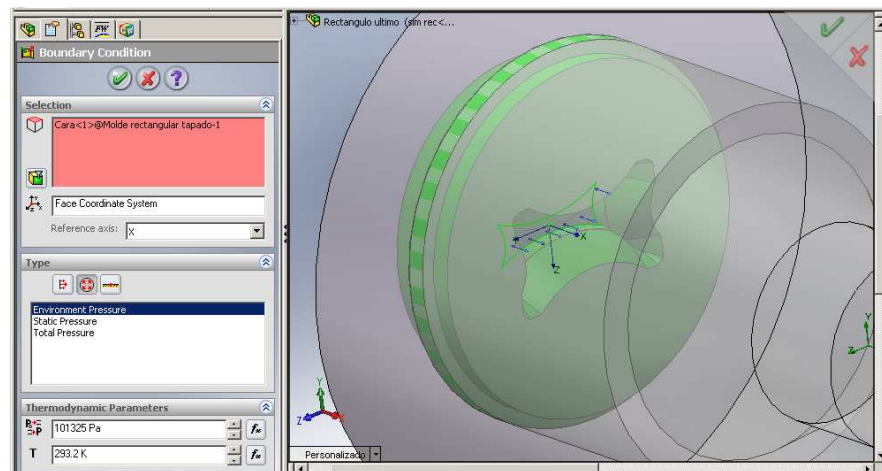


Figura 3.24 Condiciones de salida molde rectangular

- Un parámetro también que se debe ingresar son los “Goals” los cuales van a determinar qué tipo de variables se van incluir en el análisis, su forma de ingreso es “Goals<insert global goals” y se escoge con un visto las variables que para el caso del molde son las siguientes: presión estática (min. y máx.), presión total, temperatura del fluido (min. y máx.) y Flujo másico.

Luego de ingresar todas las variables se procede a ejecutar el análisis “FloWorks<Run”. Obteniendo los siguientes resultados:

- Presión: “Results<cut plot<pressure”

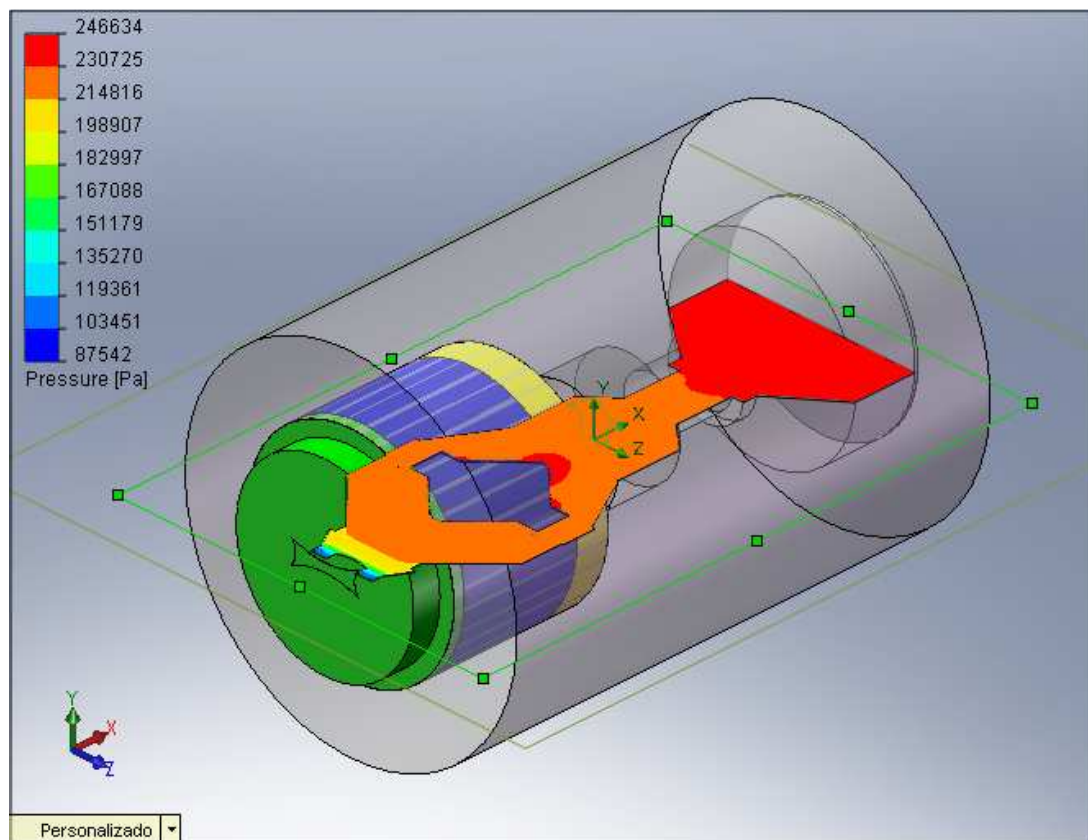


Figura 3.25 Distribución de presiones molde rectangular

- Velocidad sobre el eje X: “Results<flow trajectory<x velocity”

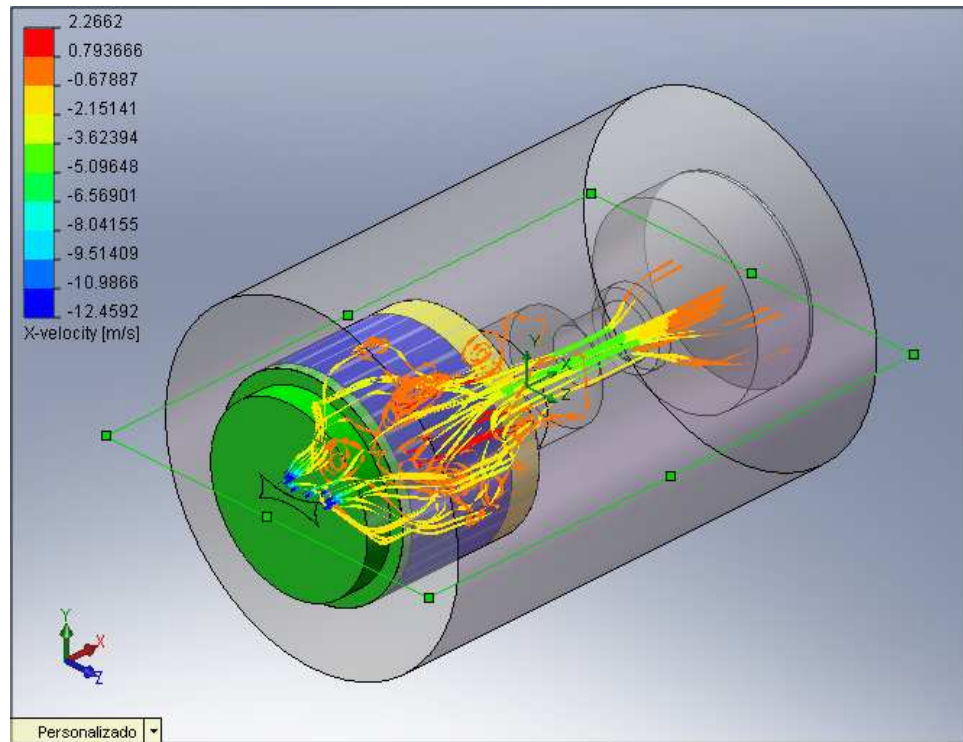


Figura 3.26 Distribución de velocidades molde rectangular

- Flujo másico: “Results<xy plots<mass flow rate”

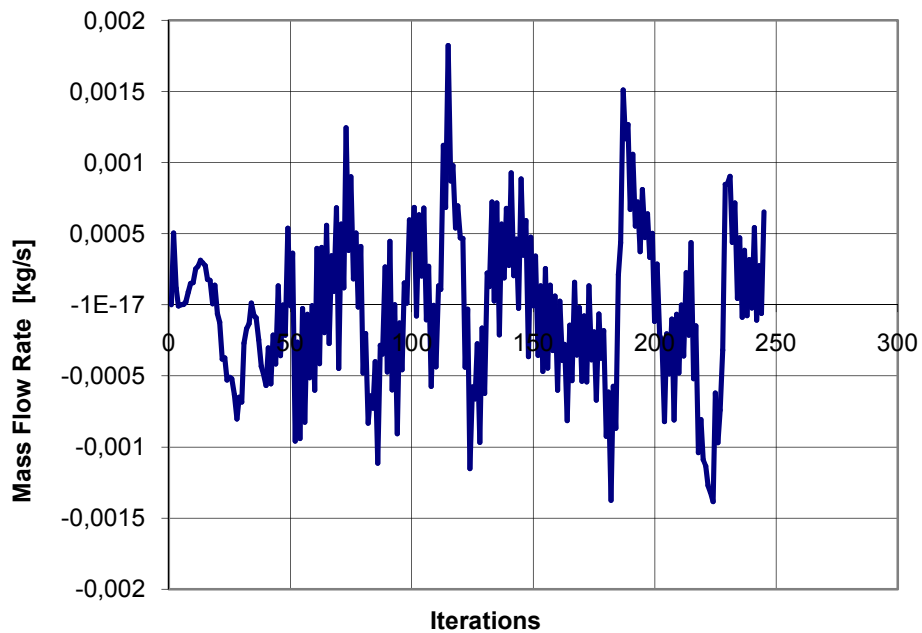


Figura 3.27 Flujo másico – iteraciones para molde rectangular

3.2.3.2. Molde cuadrado

- Para la entrada se toma en cuenta la condición de presión estática máxima (246600 Pa)

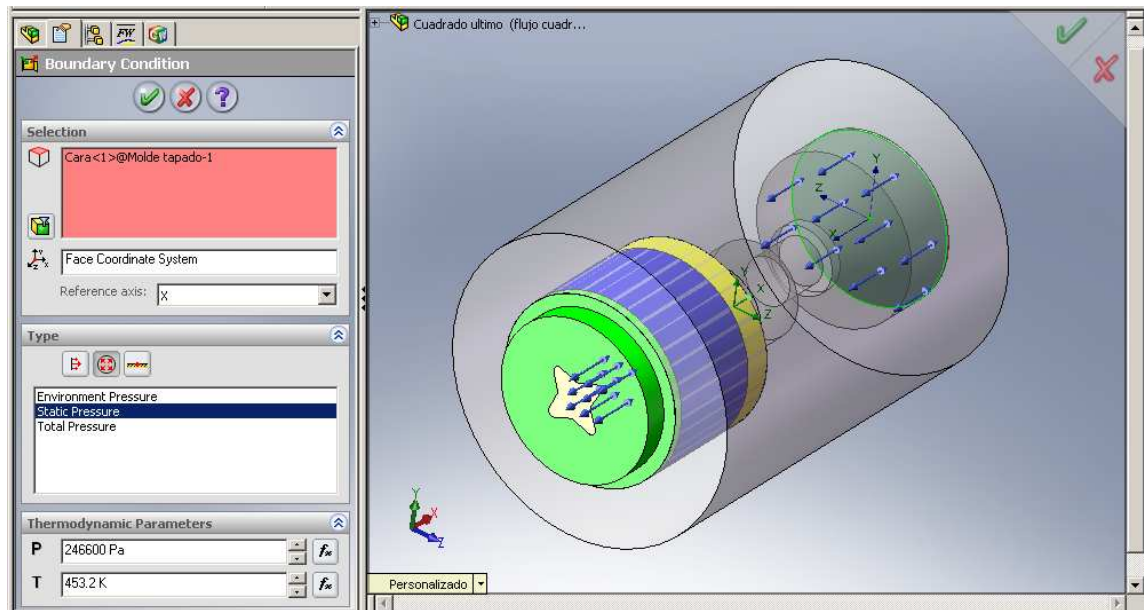


Figura 3.28 Condiciones de entrada molde cuadrado

- A la salida la presión se iguala a la presión atmosférica(101325 Pa)

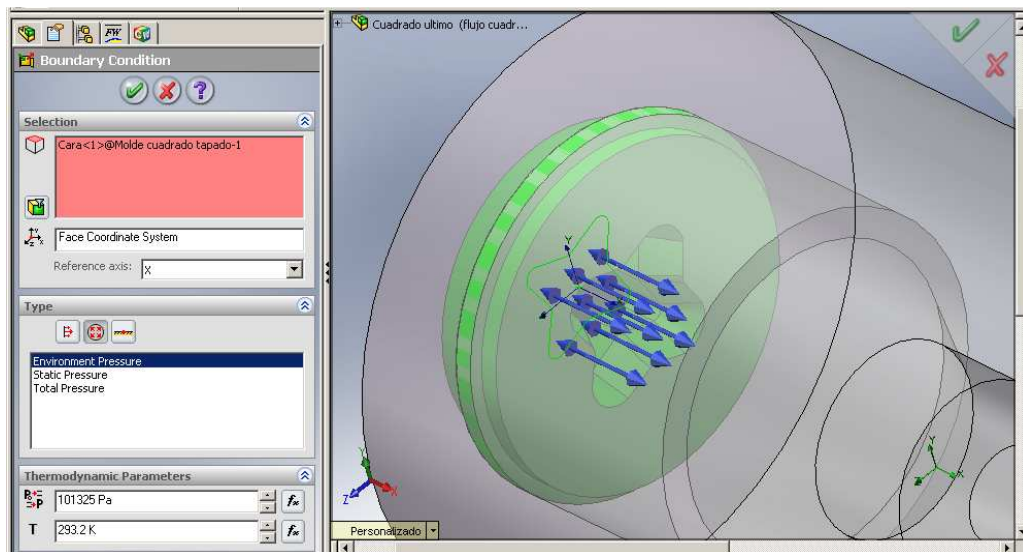


Figura 3.29 Condiciones de salida molde cuadrado

Resultados:

o Presión

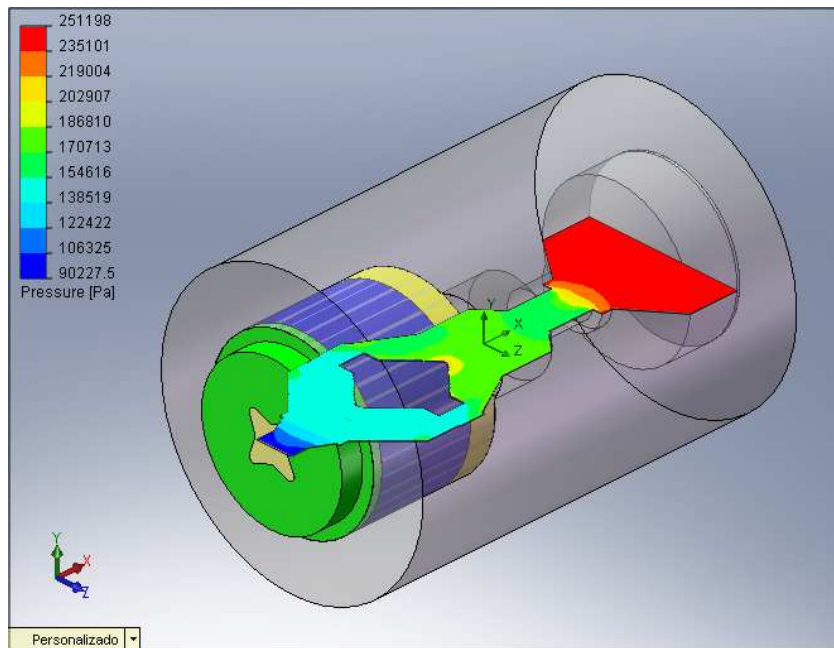


Figura 3.30 Distribución de presiones molde cuadrado

o Velocidad sobre el eje X

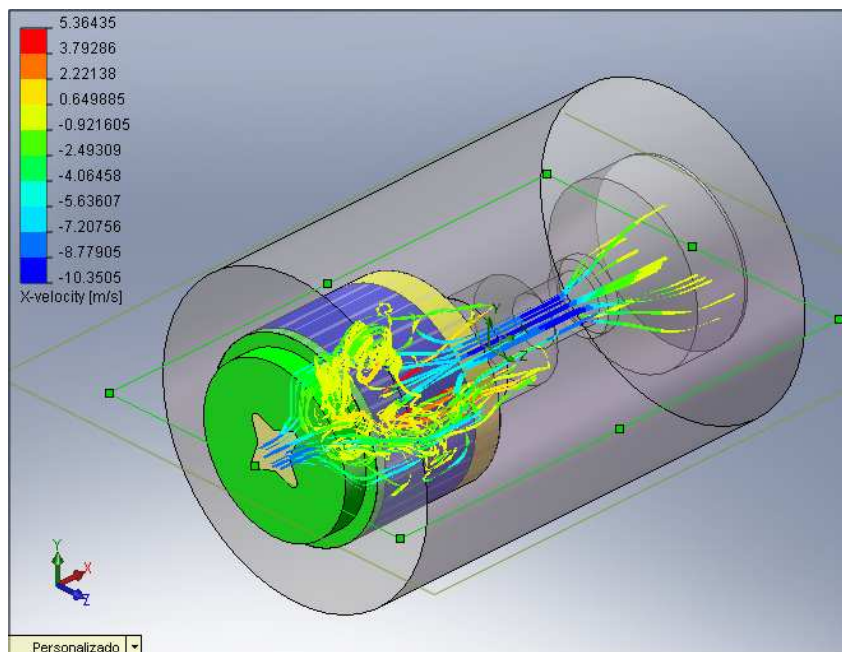


Figura 3.31 Distribución de velocidades molde cuadrado

- Flujo másico

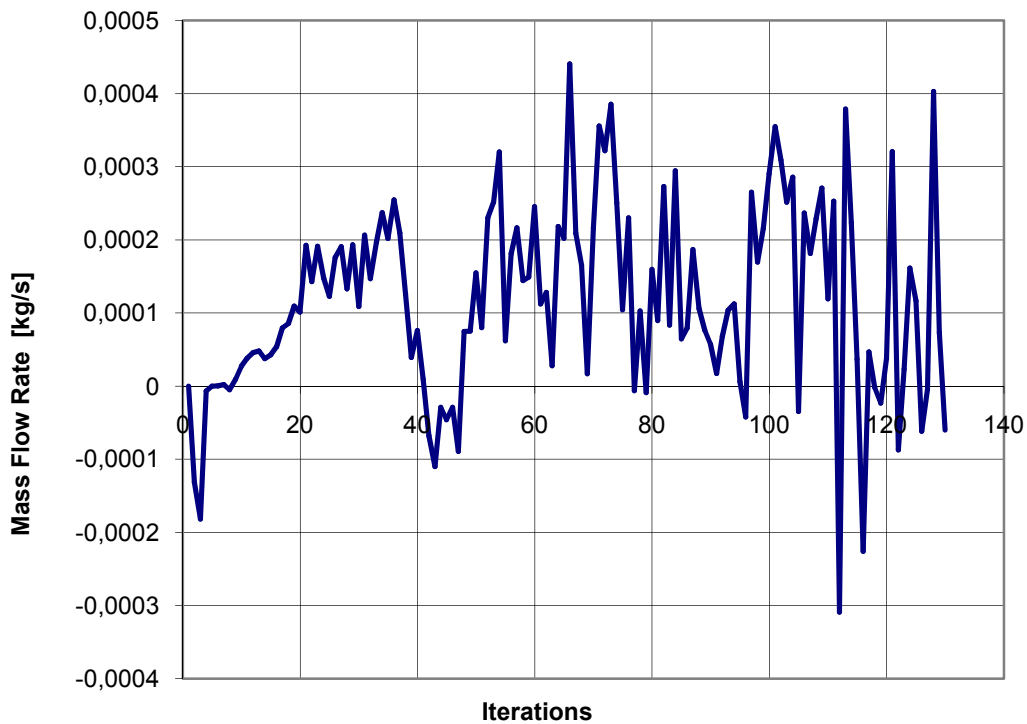


Figura 3.32 Flujo másico – iteraciones para molde cuadrado

Las graficas de flujo másico muestran la variabilidad de flujo dentro del molde ya que al ser un fluido no newtoniano (relación entre esfuerzo cortante y la velocidad de deformación es no lineal), se van a formar zonas caóticas las cuales no van a permitir que exista un flujo continuo de material ya sea para el perfil rectangular como cuadrado.

3.2.4. Variables que influyen en el flujo másico dentro del molde

3.2.4.1. Viscosidad

La viscosidad disminuye con la temperatura pero aumenta con la presión, esto hace una variabilidad permanente del proceso; los fluidos pseudoplásticos al deformarse continuamente bajo la aplicación de un esfuerzo cortante hacen que su

respuesta dinámica se cuantifique mediante la velocidad de deformación y en la mayoría de casos la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de deformación. Todas estas variables hacen que la viscosidad del plástico fundido pueda aumentar o disminuir con el tiempo.

Una mejor forma de entender esto es mediante la Reopexia, la cual es una propiedad de algunos fluidos no newtonianos que muestran variaciones dependientes con el tiempo de su viscosidad. Cuanto mayor tiempo se encuentra el fluido bajo el efecto de esfuerzos cortante; aumenta su viscosidad.

3.2.4.2. Degradación

Al degradarse un plástico cambia su estructura química y el peso molecular medio baja como producto de la ruptura de las macromoléculas.

3.2.4.3. Aditivos

Con la finalidad de homogenizar el flujo se puede utilizar lubricantes, plastificantes o fibras que ayudan al proceso ya que disminuyen la viscosidad de los plásticos en estado fundido.

3.3. SIMULACIÓN TERMO MECÁNICA

Los aspectos más importantes en el comportamiento mecánico de los metales son:

- La ductilidad, que es la propiedad de soportar grandes deformaciones plásticas para producir piezas útiles.
- La resistencia mecánica, que es responsable de que los metales soporten grandes esfuerzos sin romperse.

Ambas propiedades son fuertemente dependientes de la temperatura a la cual se realiza la prueba. En general la resistencia disminuye y la ductilidad se incrementa al aumentar la temperatura de prueba como se muestra en la Fig. 3.25. Por este motivo es que se debe realizar un análisis combinando las cargas mecánicas y térmicas.

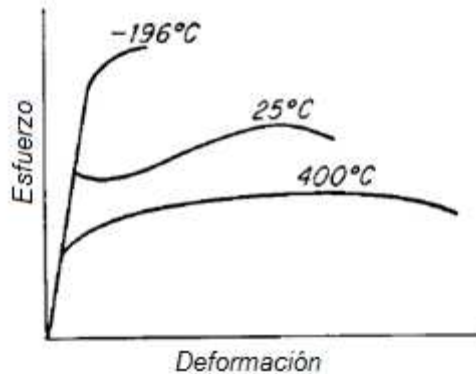


Figura 3.33 Esfuerzo – deformación de los metales ^[3.33]

Para realizar el análisis se debe determinar las variables que se deben incluir en el análisis y los datos necesarios para saber la funcionalidad de mi modelo; por lo que las preguntas que debo hacerme son “se deformara demasiado” o se producirá “sobrecalentamiento”. Las cargas que se van aplicar son cargas estructurales (Fuerza, gravedad, presión, etc.) y de expansión o contracción térmica; sabiendo que el molde va estar formado de un material dúctil como el acero puedo determinar que el análisis optimo es de un estudio estático de régimen permanente, tomando en cuenta que la temperatura de cada solido es uniforme y se conoce su distribución se ingresa en “*CosmosWorks<Estudio <Estático<Malla con elementos sólidos tetraédricos*. Las cargas aplicadas al molde fueron distribuidas de la siguiente manera:

- Restricciones de movimiento representadas con el color verde, las cuales determinan los puntos de sujeción de cada una de las partes del molde, se ingresan en “*CosmosWorks<Cargas/restricción <Restricciones*”.

- Temperatura representada por el color azul, la cual tiene un valor de 170 C en la superficie exterior del molde mientras que en el interior una temperatura de 180 C, se ingresan en “CosmosWorks <Cargas/restricción<Temperatura”.
- Presión representada con el color rojo, la cual varía su valor en función de la distribución de presiones obtenida mediante la simulación de flujo con CosmosFloWorks, el valor mayor de presión es de 0.25 MPa a la entrada mientras que al final existe una presión 0.088 MPa, se ingresan en “CosmosWorks<Cargas/restricción<Presión”.

Rectangular

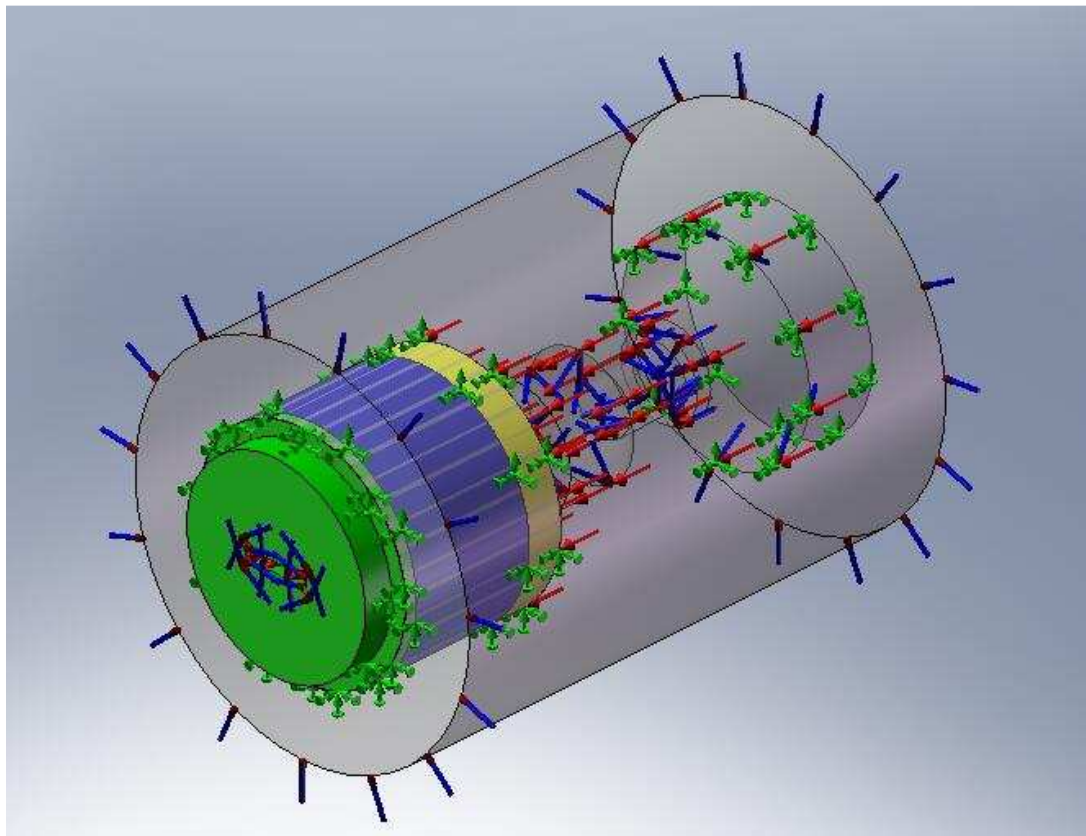


Figura 3.34 Distribución de cargas molde rectangular

Cuadrado

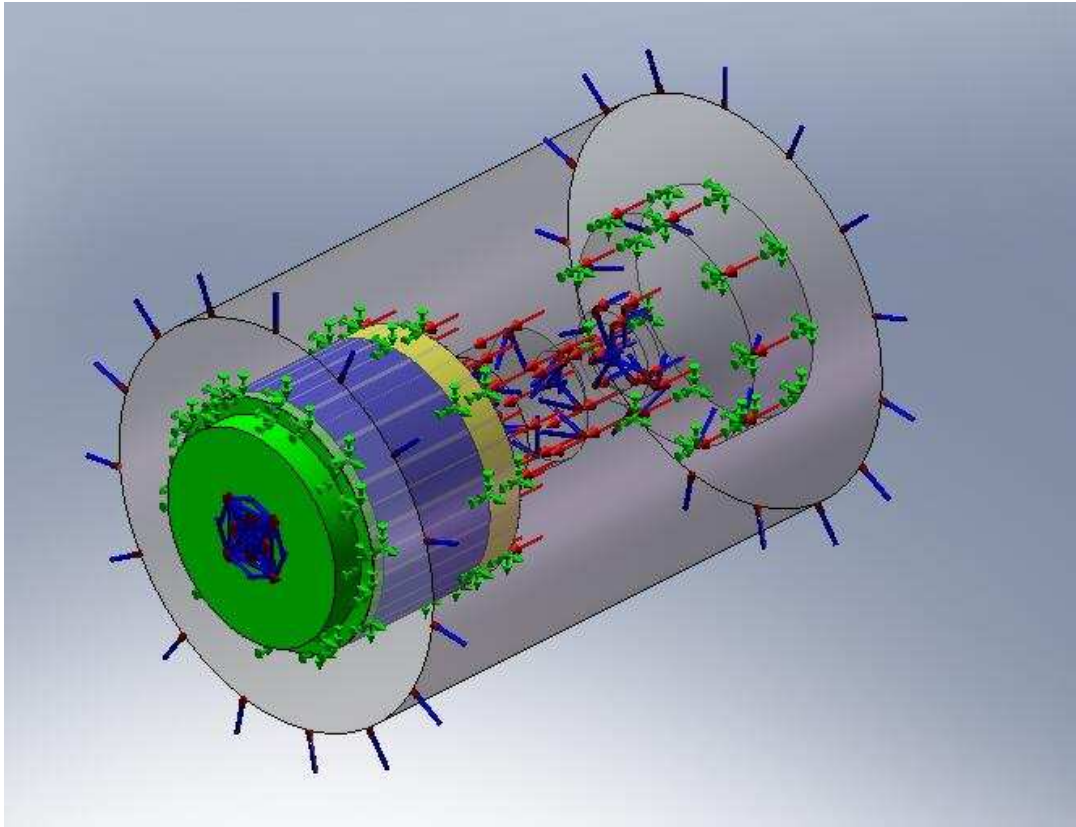


Figura 3.35 Distribución de cargas molde cuadrado

Para el análisis se debe determinar el tipo de material del molde, para lo cual se escogió el acero AISI 1045 con un tratamiento térmico de temple de 800°C, posteriormente se realizará el tratamiento de revenido a una temperatura de 450 °C obteniendo un esfuerzo a la fluencia de 531 MPa, el material se escoge en *“CosmosWorks<Material<Aplicar el material a todo<Desde archivos de biblioteca<AISI 1045”*.

Una vez ingresado todas las variables se procede a crear el mallado en *“CosmosWorks<Malla<crear”*. Para como último paso realizar el análisis en *“CosmosWorks<Ejecutar”*, el cual después de la simulación arrojó los siguientes resultados:

3.3.1. Esfuerzo de Von Mises

Es un criterio de carga estática el cual define que la falla ocurrirá en la parte compleja cuando la energía de distorsión por volumen unitario exceda una prueba de tensión simple en la falla. La forma de observar su distribución es “*Resultados <Tensiones (Von mises) <Mostrar*”.

Rectángulo:

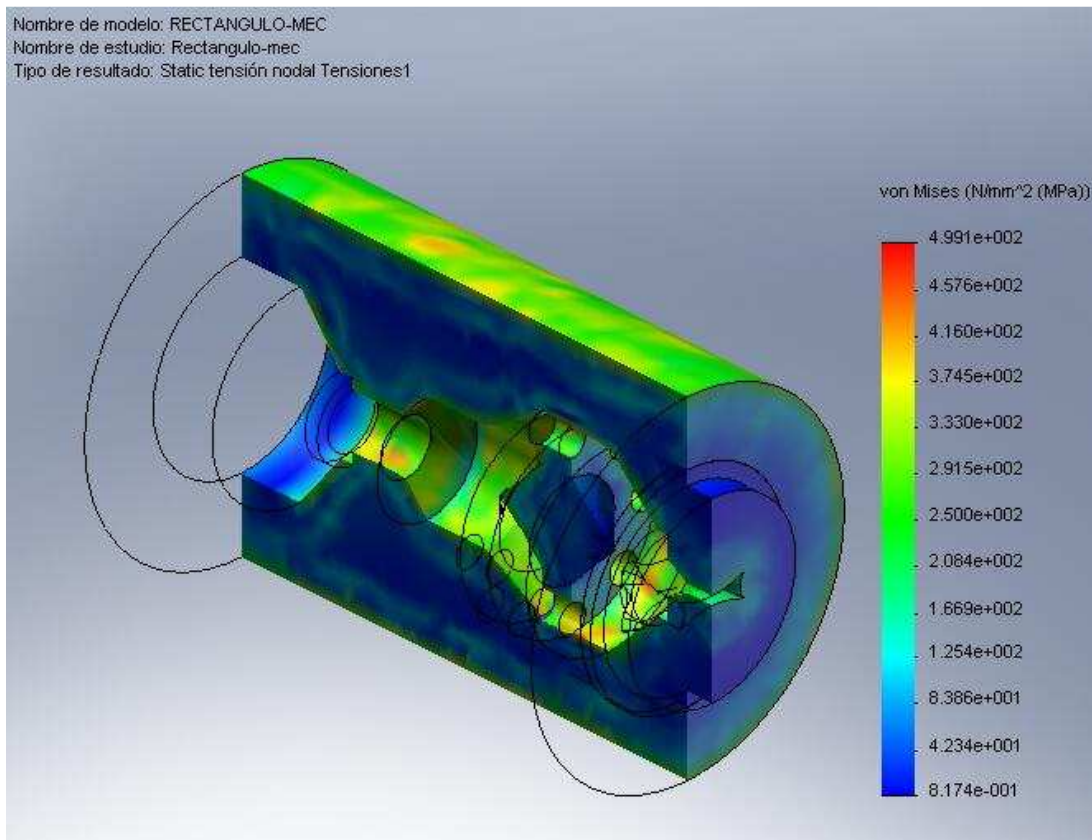


Figura 3.36 Distribución del esfuerzo de Von Mises para molde rectangular

Se observa mediante la simulación que el valor más alto de esfuerzo es de 499 MPa, pero según la distribución de colores la mayor parte del volumen del molde tiene un esfuerzo entre 200 a 380 MPa

Cuadrado:

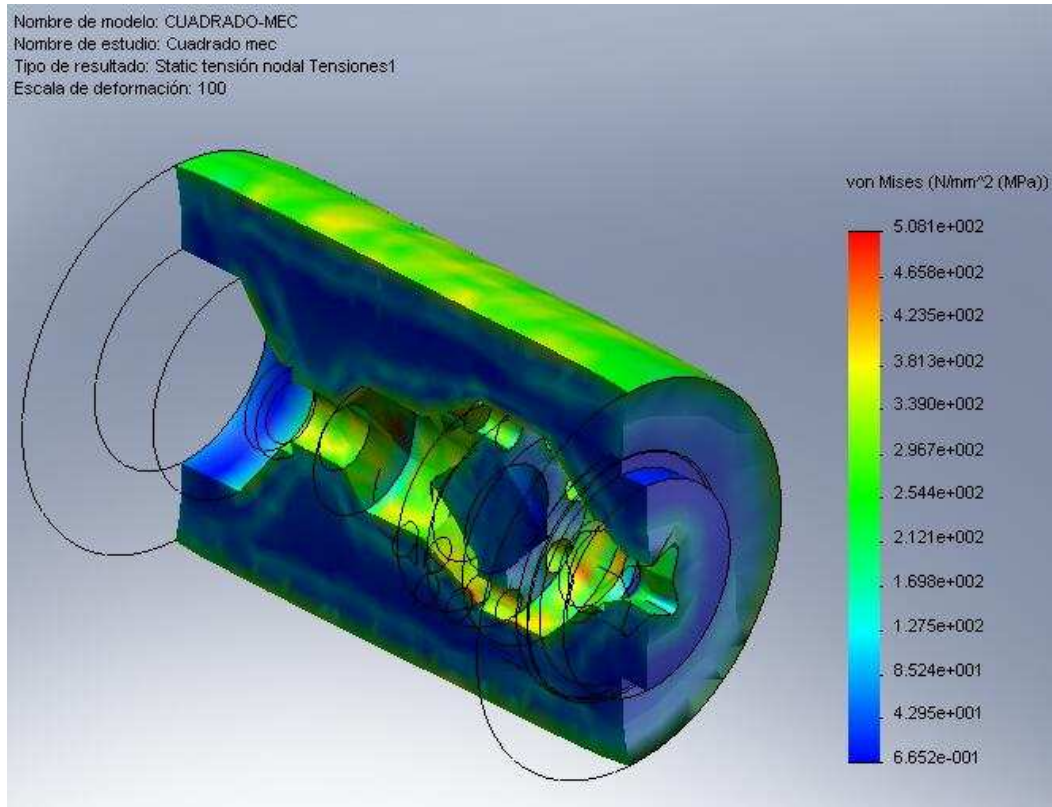


Figura 3.37 Distribución del esfuerzo de VonMises para molde cuadrado

Con respecto al molde cuadrado la simulación muestra que el valor más alto de esfuerzo es de 501 MPa, pero según la distribución de colores la mayor parte del volumen del molde tiene un esfuerzo entre 210 a 390 MPa.

El comportamiento de esfuerzos del molde para extruir perfiles cuadrados como rectangulares es similar lo cual permite determinar un mismo análisis para los dos casos.

3.3.2. Deformaciones

Se refiere a los cambios en las dimensiones o forma de un elemento cuando es sometido a cargas externas como la presión y temperatura (dilatación). La forma de observar su distribución es “*Resultados <Desplazamientos<Mostrar*”.

Rectángulo:

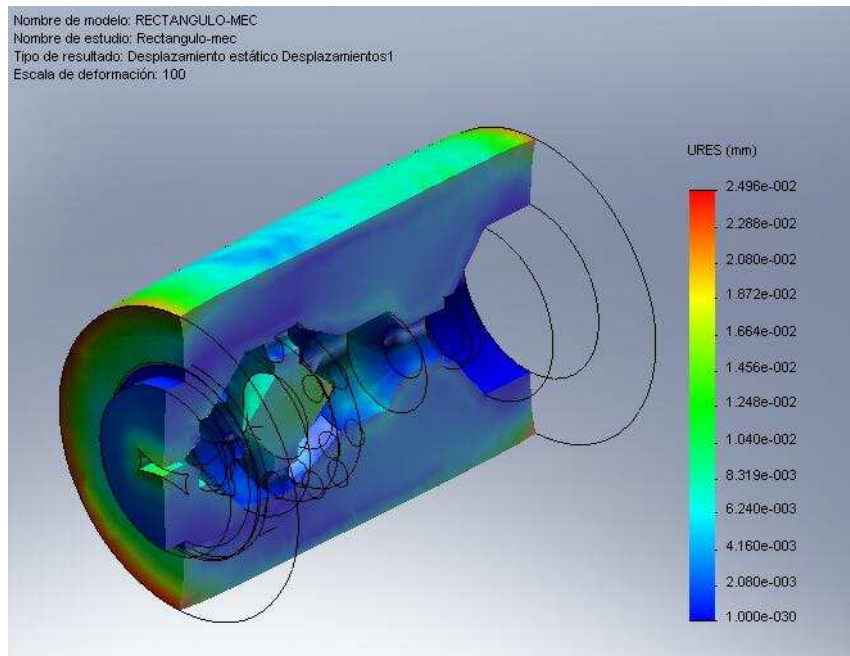


Figura 3.38 Distribución de la deformación para el molde rectangular

Cuadrado:

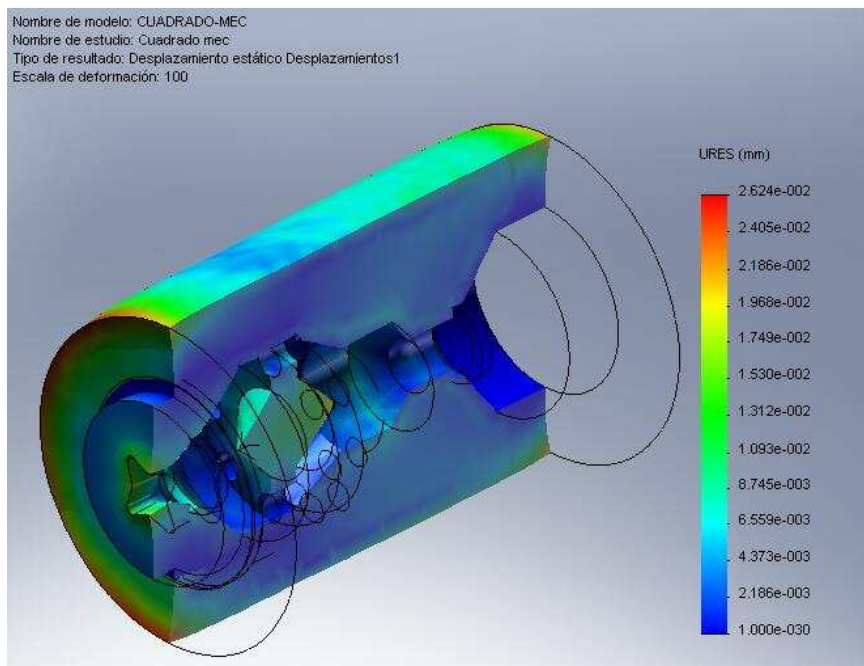


Figura 3.39 Distribución de la deformación para el molde cuadrado

Las deformaciones máximas están alrededor de 0.02 mm y están ubicados en la superficie exterior del molde; lo cual es lógico ya que en esos puntos la temperatura producida por los calefactores tiene mayor área de contacto.

3.3.3. Deformaciones unitarias

Al ser la relación existente entre la deformación total y la longitud inicial del elemento, nos permite determinar la deformación del elemento sometido a esfuerzos mecánicos y térmicos. La forma de observar su distribución es “Resultados <Deformaciones unitarias<Mostrar”.

Cálculo de la deformación unitaria máxima

$$E := 200000000000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{Modulo de Young del acero}$$

$$\sigma_{\text{fluencia}} := 531000000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{Esfuerzo a la fluencia del acero AISI 1045}$$

$$\varepsilon := \frac{\sigma_{\text{fluencia}}}{E} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = 2.655 \times 10^{-3}$$

Rectángulo:

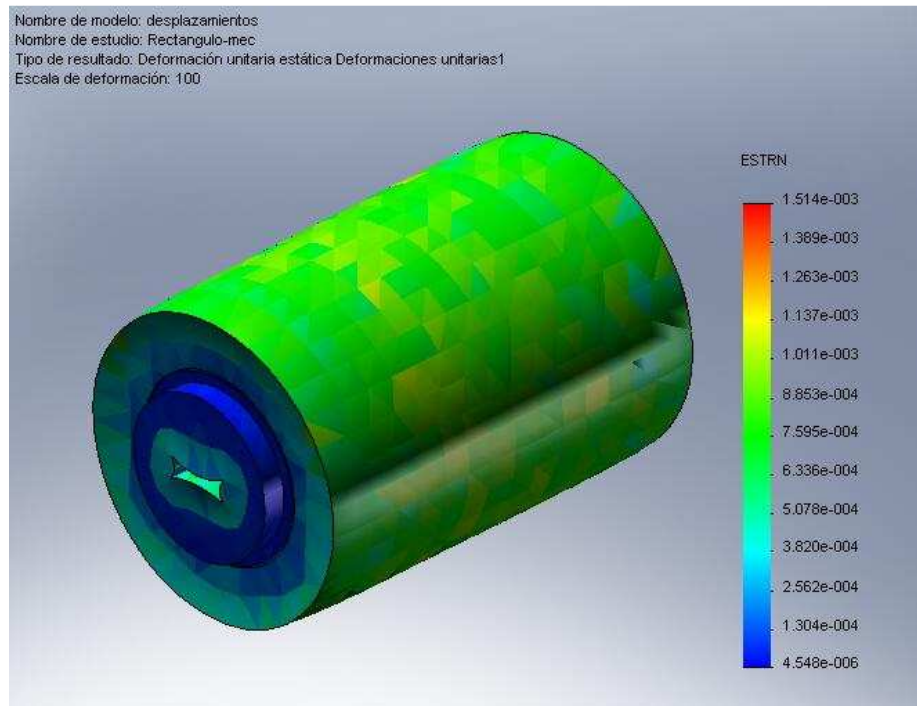


Figura 3.40 Distribución de la deformación unitaria para molde rectangular

Cuadrado:

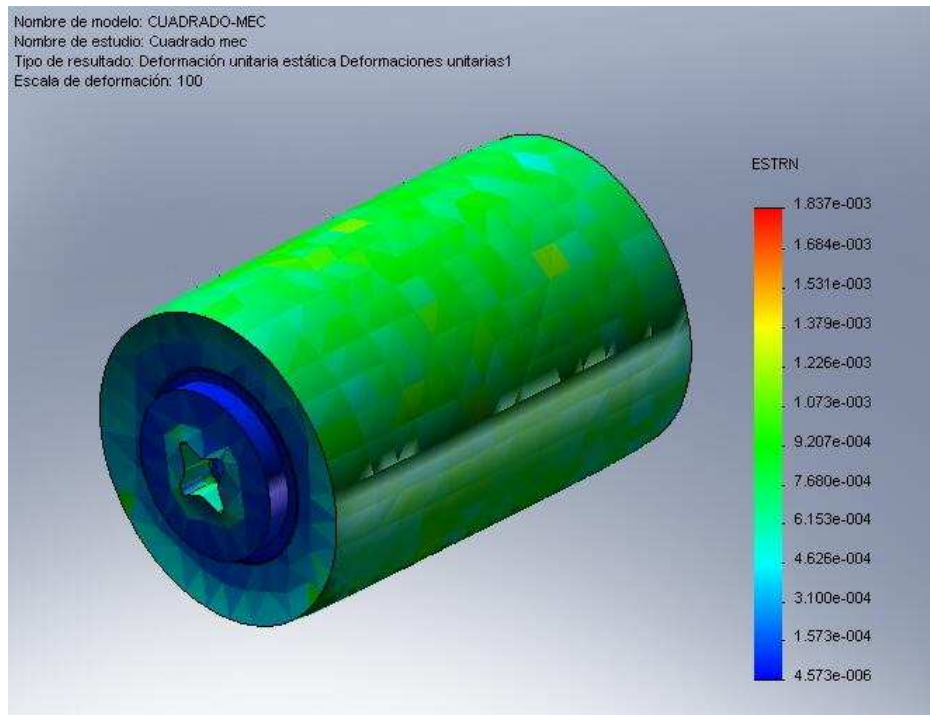


Figura 3.41 Distribución de la deformación unitaria para molde cuadrado

En la tabla 3.1 se muestra un resumen de las características que se van a presentar en condiciones máximas de operación en el proceso de extrusión dentro del molde.

Tabla 3.1 Tabla de resumen de resultados

Tipo de molde	Esfuerzo de Von Mises (MPa)		Deformaciones (mm)		Deformaciones unitarias	
	máx.	min.	máx.	min	máx.	min
Molde perfil rectangular	499	82	$2.4 e^{-2}$	$1 e^{-30}$	$1. e^{-3}$	$4.5 e^{-6}$
Molde perfil cuadrado	508	66	$2.6 e^{-2}$	$1 e^{-30}$	$1.8 e^{-3}$	$4.5 e^{-6}$

REFERENCIAS

FIGURAS

3.9 http://capitulo6_2extrusión.pdf

3.33 http://temperatura_5185.pdf

CAPITULO IV

DISEÑO MECÁNICO

En ingeniería el diseño mecánico es resultado de investigaciones sobre el límite de fluencia de los materiales, valor de esfuerzo aplicado en el que el material comienza a deformarse permanentemente, adquiriendo propiedades diferentes a las que tenía antes de someterlo a una fuerza. Para lograr un diseño adecuado, se debe llegar a un cociente límite de fluencia / fuerza aplicada (en la manera más sencilla de presentarlo) mayor a la unidad. El proceso de diseño inicia con la identificación de la necesidad, para luego plantear el problema concreto, también se realiza de manera iterativa el análisis y síntesis hasta concluir con el diseño final.

4.1. MATERIAL DEL MOLDE

Antes de la verificación del diseño de los moldes se debe determinar el material óptimo para soportar los esfuerzos producidos por el proceso de extrusión para lo cual se considera los siguientes parámetros:

- T_{max} - exterior = 170 C
- T_{max} - interior = 180 C
- P_{max} = 246600 Pa
- $\sigma_{VonMisses}$ - rectángulo = 499 MPa
- $\sigma_{VonMisses}$ - cuadrado = 508 MPa

4.1.1. Características que debe tener el material

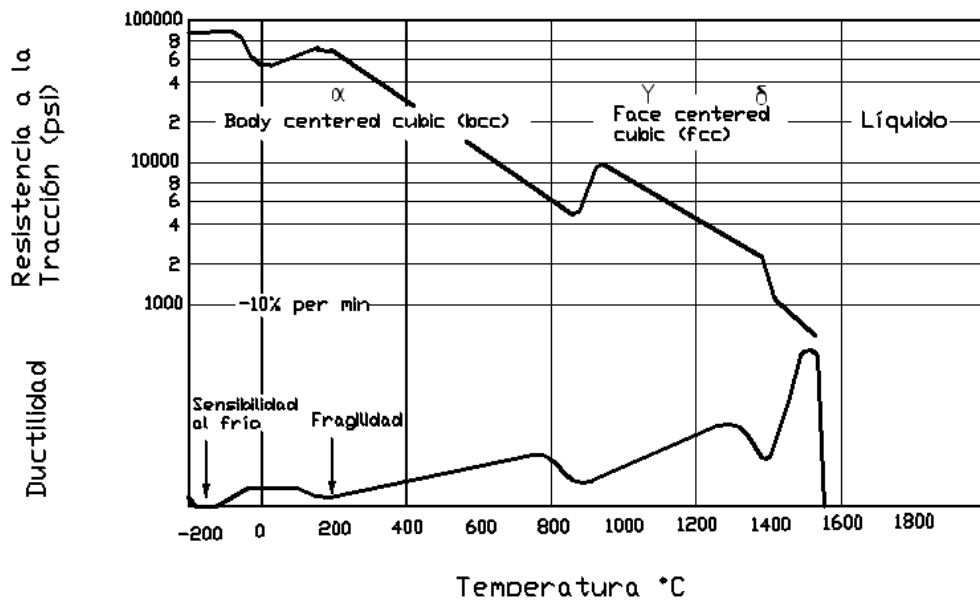


Figura 4.1 Ductilidad y resistencia a la tracción en función de la temperatura de un acero al carbón [4.1]

La grafica muestra la variación de la resistencia a la tracción y la ductilidad en función de la temperatura, es importante saber esto ya que al régimen de trabajo para un acero con medio contenido de carbono el esfuerzo de 0 a 200 °C tiene una tendencia ascendente, esto implica que las propiedades del material no se van a ver afectadas por la temperatura máxima de 180 °C. Por otro lado de 150 a 300 °C la ductilidad cae por la fragilidad en azul o anclamiento por las dislocaciones de átomos de carbón, nitrógeno, etc.; se observa una estructura celular diferente que generalmente tiene muy alta densidad de dislocaciones enmarañadas. Las dislocaciones son responsables de la ductilidad de los metales. La línea de las dislocaciones puede deslizarse sobre planos cristalinos (ordenamiento tridimensional) de la estructura cuando se aplica esfuerzo a los metales y esto produce la deformación plástica. Para nuestra temperatura máxima de operación el rango de temperatura en el cual se vuelve frágil el material es muy bajo por lo que no afectaría.

Para comparar las propiedades mecánicas de diferentes materiales a varias temperaturas se utiliza la temperatura homóloga, que relaciona la temperatura de prueba con la de fusión, ambas expresadas en Kelvin.

$$T_H = \frac{T_{de_prueba}}{T_{fusión}} \left[\frac{°K}{°K} \right] \quad (4.1)$$

4.1.2. Rangos de temperatura en la deformación

No existe una ecuación del tipo: $e_p = f(\sigma_o, T, t \text{ estructura})$. Sin embargo, es posible describir cualitativamente el comportamiento de los metales de acuerdo a los mecanismos de endurecimiento o ablandamiento que puedan actuar a diferentes temperaturas. Se pueden definir los rangos de temperaturas en el comportamiento mecánico como:

Tabla 4.1 Características de rangos de la temperatura homóloga ^[4.1]

T - HOMOLOGA	CARACTERISTICAS
0 - 0.01	Fragilidad a baja temperatura
0.1 – 0.2	Temperatura de transición
0.2 – 0.4	Deformación en frío
0.4	Temperatura de re cristalización
0.4 – 0.7	Deformación en tibio
0.7 – 0.9	Deformación en caliente
1	Fusión del metal

$$T_H = \frac{453}{1673}$$

$$T_H = 0.27$$

4.1.2.1. Deformación en frío

La deformación en frío se produce cuando el material endurece progresivamente a medida que aumenta la deformación plástica, esto implica que no se presentan

fenómenos de recuperación ni recristalización. El rango de trabajo en frío está limitado entre las temperaturas de transición dúctil, frágil y de recristalización.

El concepto de deformación en frío no está relacionado con la temperatura de trabajo.

Por ejemplo, el plomo funde a 326°C (599°K) y su temperatura de recristalización es la ambiente o aún inferior, según la pureza del metal. Por otra parte, el tungsteno funde a 3410°C (3683 °K) y recristaliza a 1100°C. Por lo anterior, el plomo se trabaja en caliente a temperatura ambiente mientras que el tungsteno en frío a 800C. El trabajo en frío tiene los siguientes inconvenientes:

- La resistencia que presenta el metal a ser deformado es, por lo común, elevada y aumenta durante el proceso debido al endurecimiento por deformación.
- La ductilidad, en general, es reducida, por lo que no se pueden alcanzar grandes deformaciones plásticas sin recurrir a recocidos intermedios.

Las ventajas que presenta la deformación en frío son:

- No se requiere energía para el calentamiento del metal
- No hay pérdidas de material por oxidación,
- Se obtienen buenas tolerancias dimensionales
- El acabado superficial de las piezas es excelente,
- Se puede endurecer al metal por deformación plástica para mejorar su resistencia en servicio.

La mayor parte de la energía utilizada en la deformación en frío de un metal se disipa como calor y el resto se almacena como defectos cristalinos. Un acero que responde a estas exigencias de trabajo de presión y temperatura es el AISI 1045 con resistencia a la fluencia de 531 MPa. Sin embargo para un régimen mayor de temperatura y presión como es para el trompo y placa rompedora se va utilizar un acero Bohler M201 con una resistencia a la fluencia de 880 MPa.

4.2. MOLDE PERFIL RECTANGULAR

Para determinar si el molde resiste a las cargas aplicadas de presión y temperatura se tiene el factor de seguridad el cual se puede determinar su distribución mediante CosmosWorks, tomando en cuenta que se requiere una presión para que trabaje el molde; es necesaria la presión simplemente para forzar el paso del material fundido a través del molde. La característica del molde es, por lo tanto, opuesta en forma; la producción máxima se deberá a una presión máxima.

4.2.1. Distribución del factor de seguridad molde rectangular

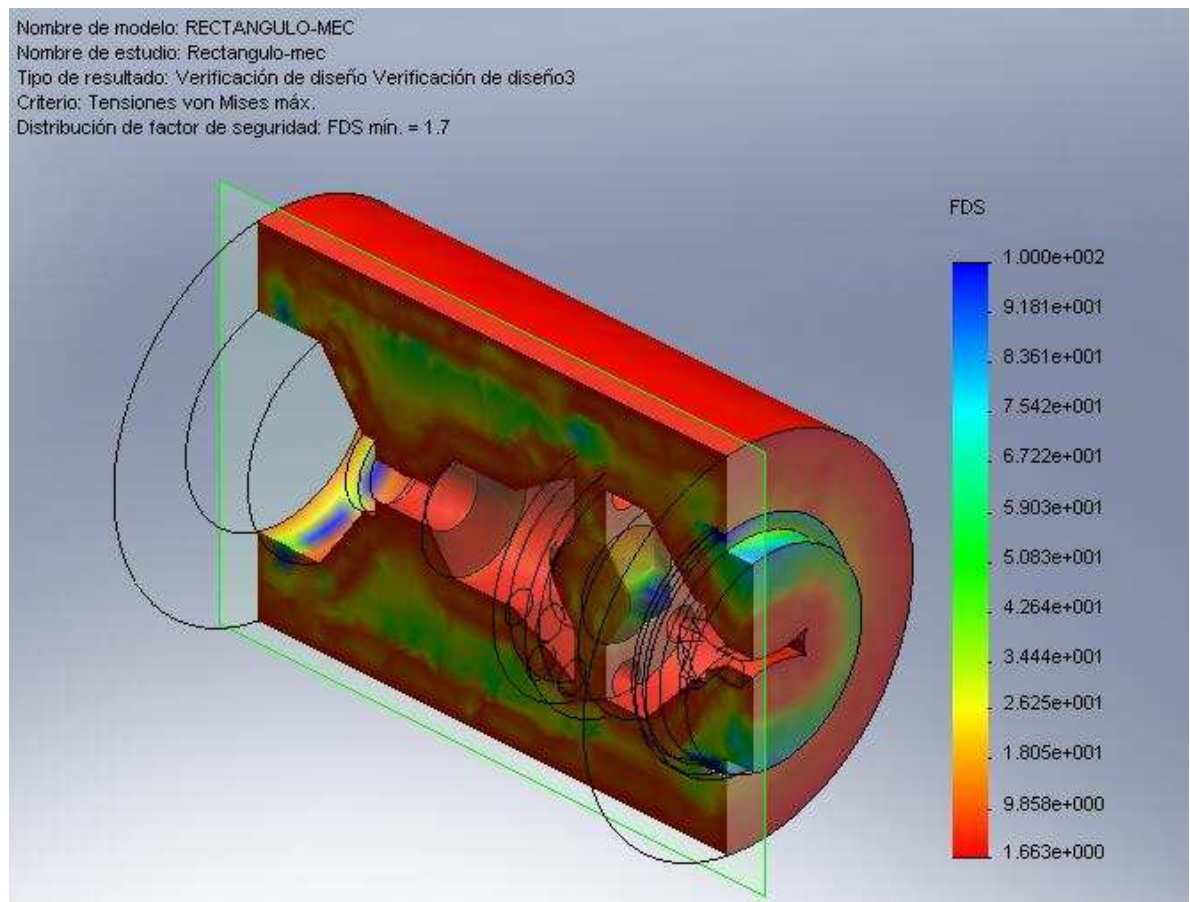


Figura 4.2 Distribución del factor de seguridad molde rectangular

Con análisis preliminares se pudo determinar que los puntos más críticos dentro del diseño son los orificios de la placa rompedora y con un acero AISI 1045 nos daba un factor de seguridad mínimo de 1.1 por lo cual se determino cambiar el material para la placa rompedora a un acero Bohler M201 el cual nos permitió obtener un factor de seguridad mínimo de 1.6, el cual es apto para resistir las cargas térmicas y mecánicas de operación. Para conocer de mejor manera el comportamiento de las cargas se crearon ISO superficies las cuales nos muestran el lugar y volumen en el que se encuentran los mayores esfuerzos de VonMises.

4.2.2. ISO superficies molde rectangular

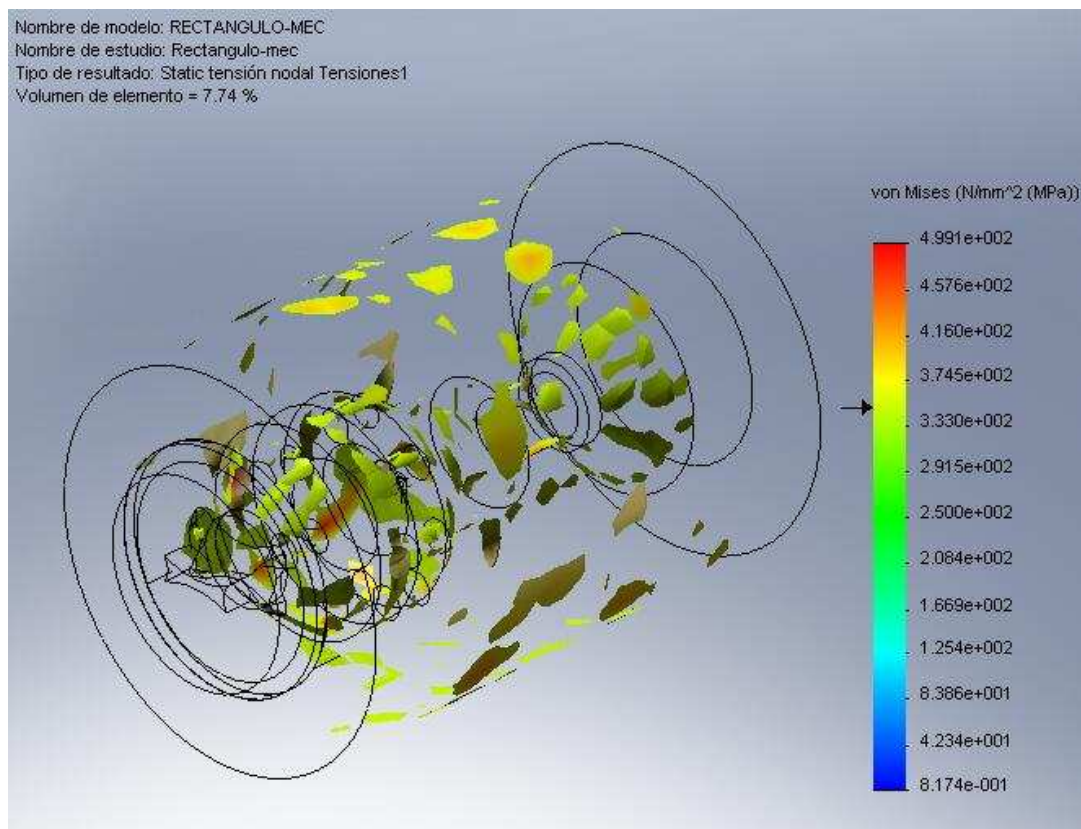


Figura 4.3 ISO superficie a esfuerzos mayores a 350 MPa molde rectangular

Como muestra la ISO superficie a esfuerzos mayores 350 MPa se presentan en la reducción de sección en la entrada del molde, en la placa rompedora y boquilla los cuales son acumuladores de presión. Cabe señalar que se busco los ángulos de inclinación para la reducción y ampliación de sección óptimos, los diámetros de

perforación para la placa rompedora y evitar las esquinas donde se pueda acumular el plástico fundido para minimizar los esfuerzos.

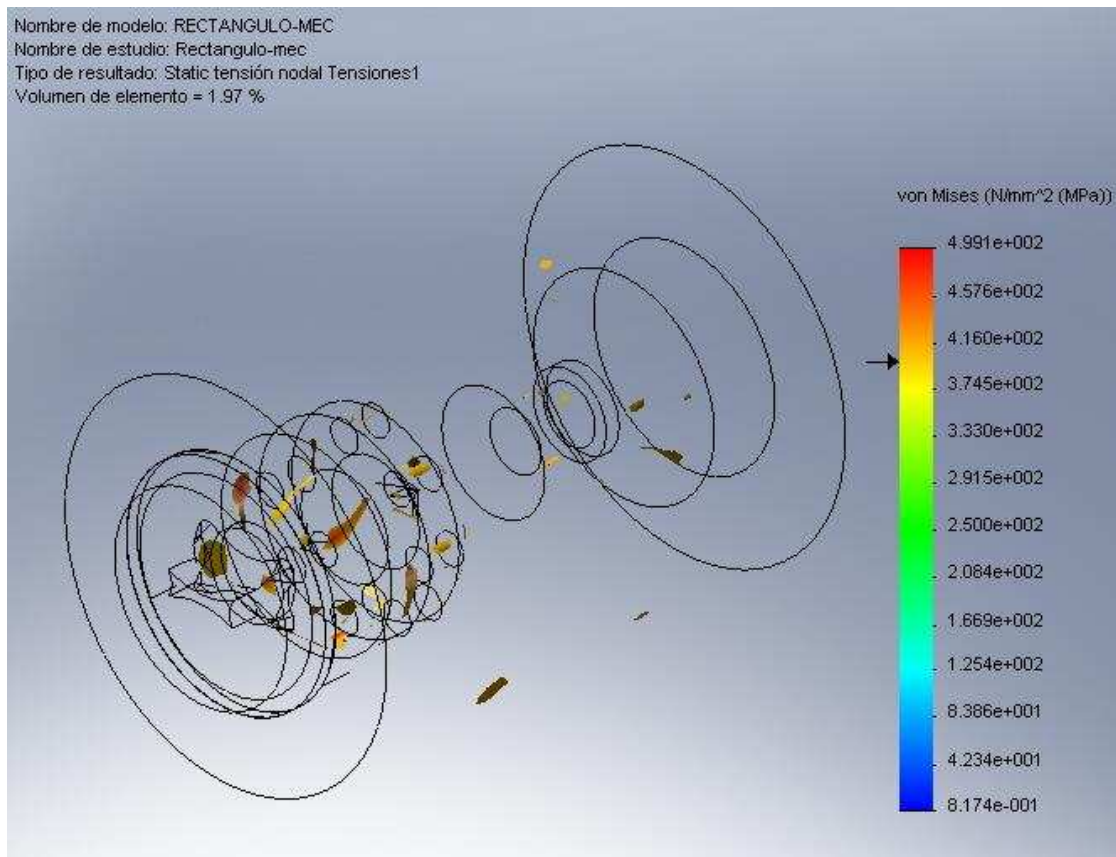


Figura 4.4 ISO superficie a esfuerzos mayores a 390 MPa molde rectangular

Como muestra la Figura 4.4 los esfuerzos más altos se concentran en la placa rompedora, boquilla de relajación y descarga, ya que en esos lugares se va producir acumulación de material fundido y por consiguiente gran presión y temperatura, pero cabe señalar que esos puntos ocupan menos del 2% del volumen total del molde.

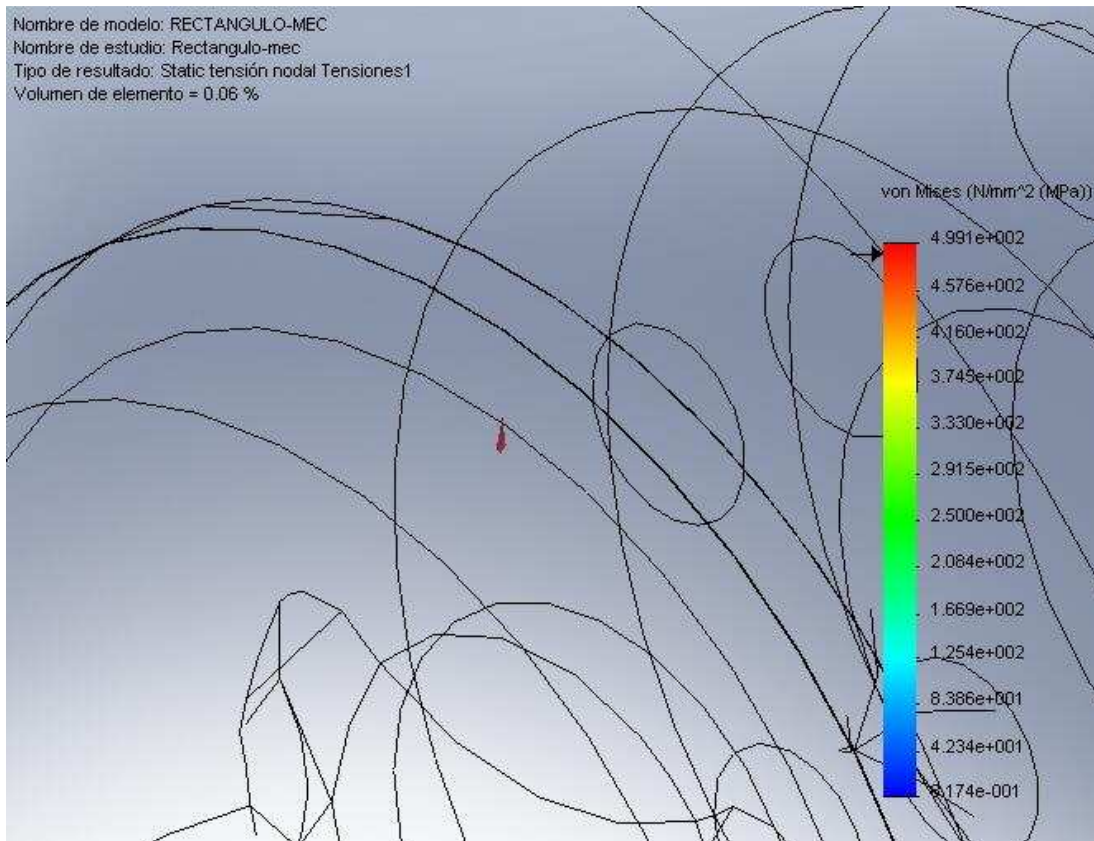


Figura 4.5 ISO superficie a esfuerzos mayores a 499 MPa molde rectangular

El punto más crítico con un esfuerzo de 499 MPa se encuentra en la placa rompedora pero con un 0.06% del volumen total. Mediante la distribución del factor de seguridad se puede determinar que el molde no fallara pero como se indico anteriormente se busco un material que permita tener un factor de seguridad mínimo de 1.6 una vez conocido los puntos más críticos.

Con la finalidad de saber con precisión los puntos en los cuales el material puede sufrir una falla se hizo una ISO superficie mostrando las áreas en las cuales el factor de seguridad está entre 1.6 y 2.2 el cual se muestra en la Figura 4.6.

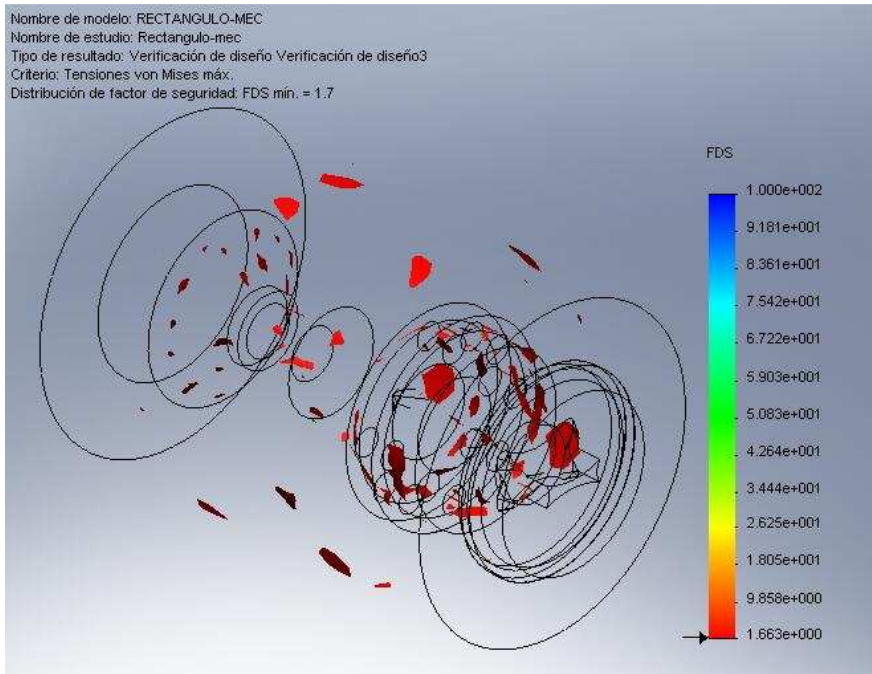


Figura 4.6 ISO superficie de distribución del FS entre 1.6 y 2.2 molde rectangular

Al conocer que el parámetro crítico para este tipo de análisis es la temperatura se determino obtener datos de distribución del factor de seguridad y esfuerzo máximo de Von Mises a varios rangos de temperatura, para los cuales se van a realizar las pruebas de funcionamiento.

Tabla 4.2 Variación de esfuerzo y factor de seguridad para distintas temperaturas de funcionamiento molde rectangular

Rango de temperaturas(C) Salida - entrada	Esfuerzo de Von Mises (MPa)	Factor de seguridad
170 - 180	499	1,66
165 - 175	483	1,68
160 - 170	466	1,69
155 - 165	450	1,73
150 - 160	434	1,75
145 - 155	418	1,81
140 - 150	402	1,85
135 - 145	386	1,92

4.3. MOLDE PERFIL CUADRADO

Al igual que el molde para perfil rectangular CosmosWorks muestra la distribución del FS para perfil cuadrado en función de las variables ingresadas de presión y temperatura.

4.3.1. Distribución del factor de seguridad molde cuadrado

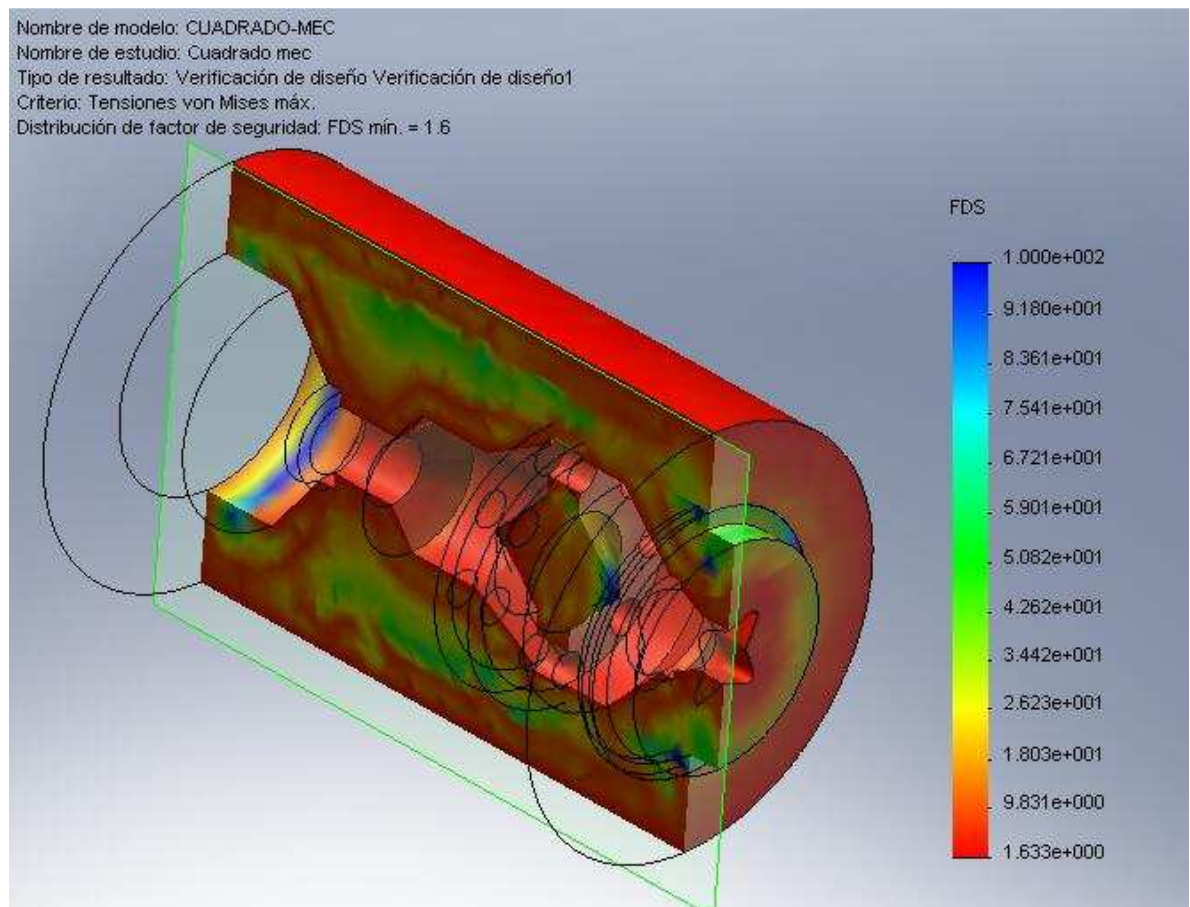


Figura 4.7 Distribución del factor de seguridad molde cuadrado

La distribución muestra un rango del factor de seguridad de 1.6 a 100, pero para tener datos más precisos se crearon ISO superficies del esfuerzo de Von Mises.

4.3.2. ISO superficies molde cuadrado

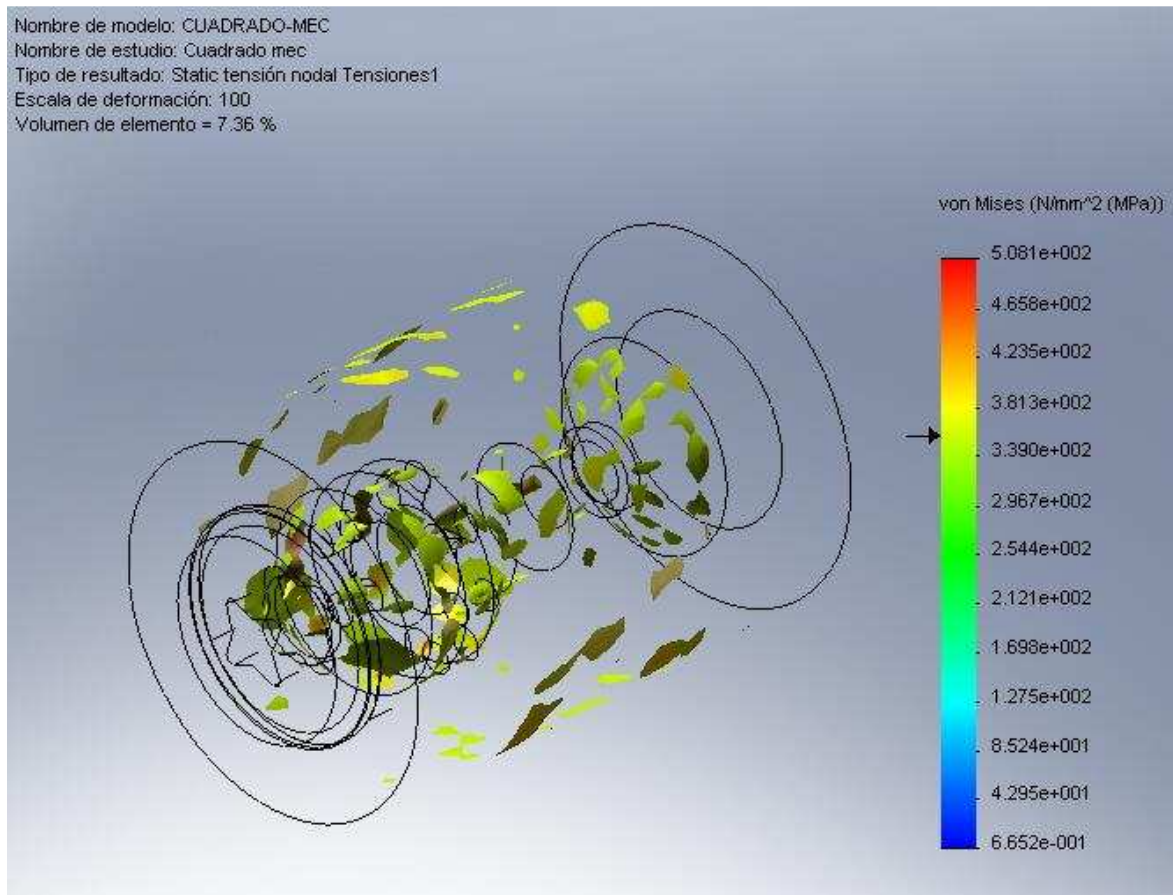


Figura 4.8 ISO superficie a esfuerzos mayores a 355 MPa molde cuadrado

Como muestra la ISO superficie a esfuerzos mayores 355 MPa se presentan en la reducción de sección en la entrada del molde, en la placa rompedora y boquilla es decir en los mismos lugares que el molde para perfil rectangular.

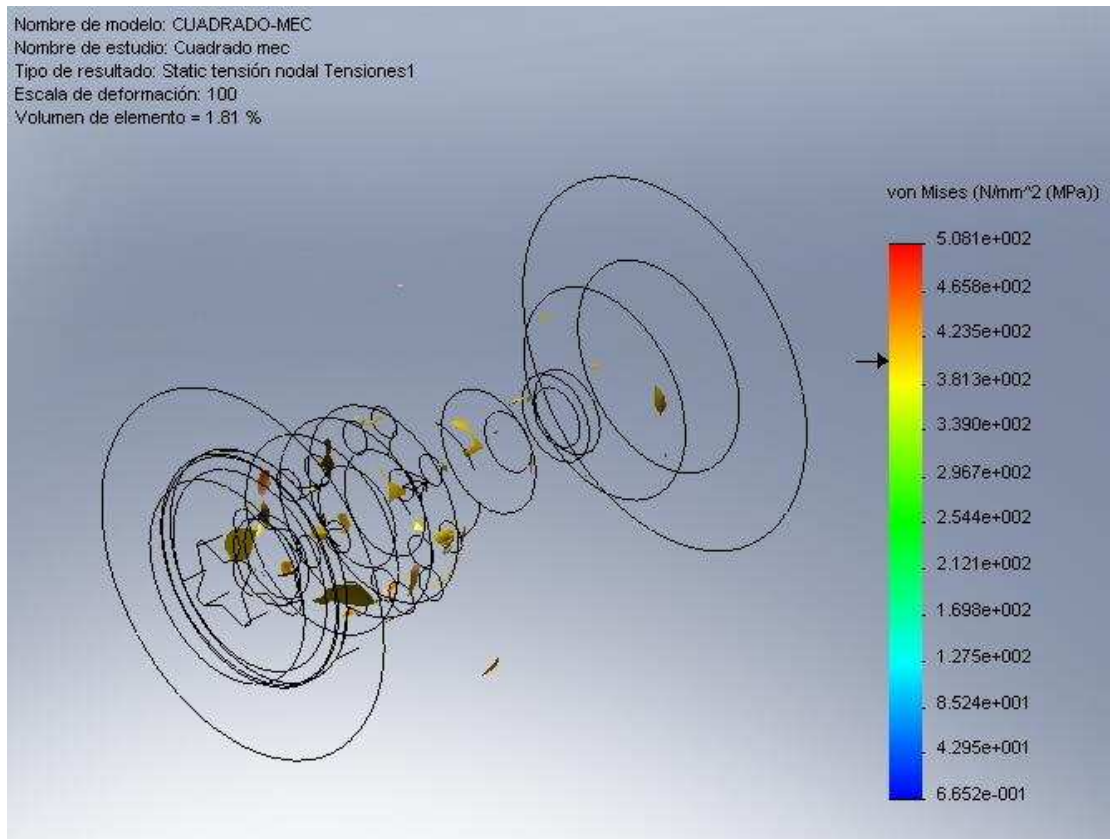


Figura 4.9 ISO superficie a esfuerzos mayores a 402 MPa molde cuadrado

Se muestra una vez más que existen zonas claras de acumulación de esfuerzo térmico y mecánico, por lo cual son las zonas más críticas a pesar de ocupar un volumen menor al 2%.

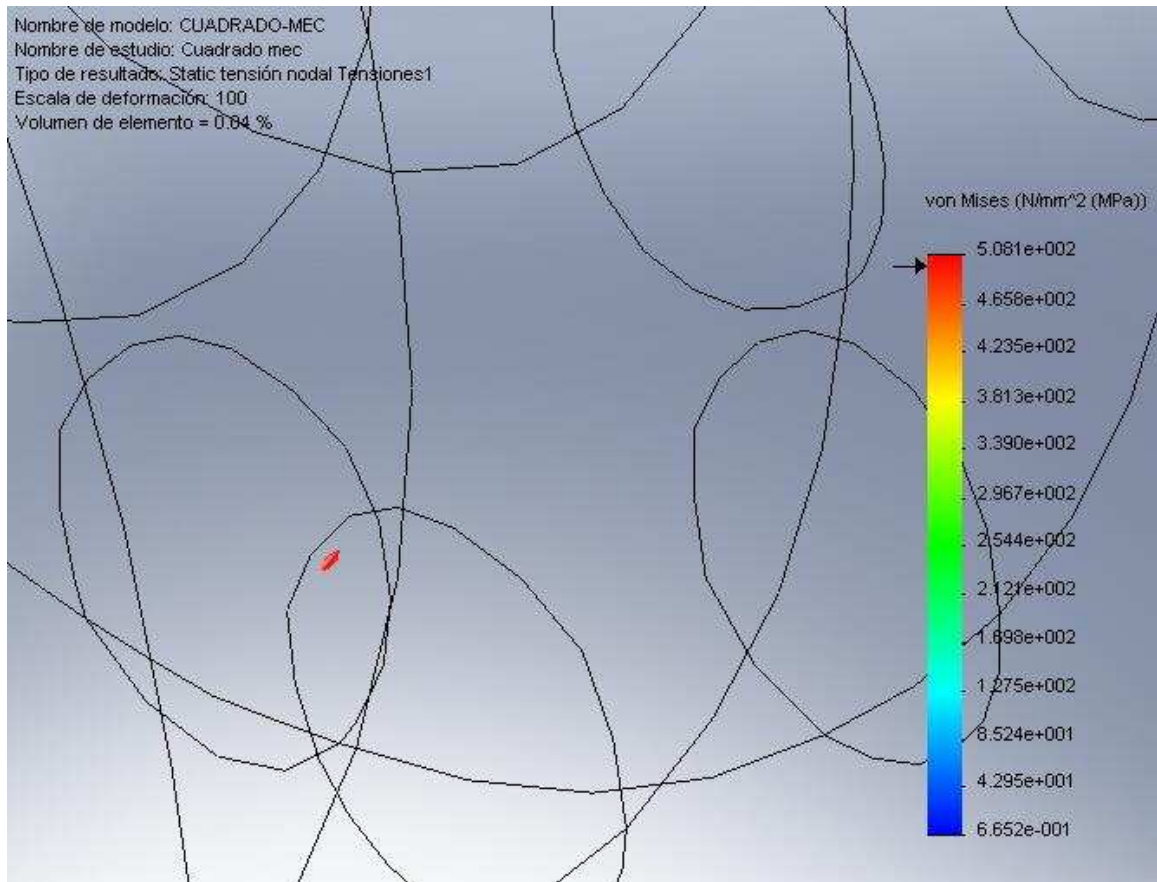


Figura 4.10 ISO superficie a esfuerzos mayores a 508 MPa molde cuadrado

El punto más crítico con un esfuerzo de 508 Mpa se encuentra en uno de los orificios de la placa rompedora pero con un 0.04% del volumen total. Pero como se utilizo un material que permite tener un factor de seguridad de 1.6 mínimo en esa área, no va existir ninguna falla mientras este en operación.

Al igual que para el molde perfil rectangular se va determinar una distribución de factor de seguridad de para conocer los puntos críticos en un rango controlado de FS de 1.6 a 2.2, como muestra la Figura 4.11.

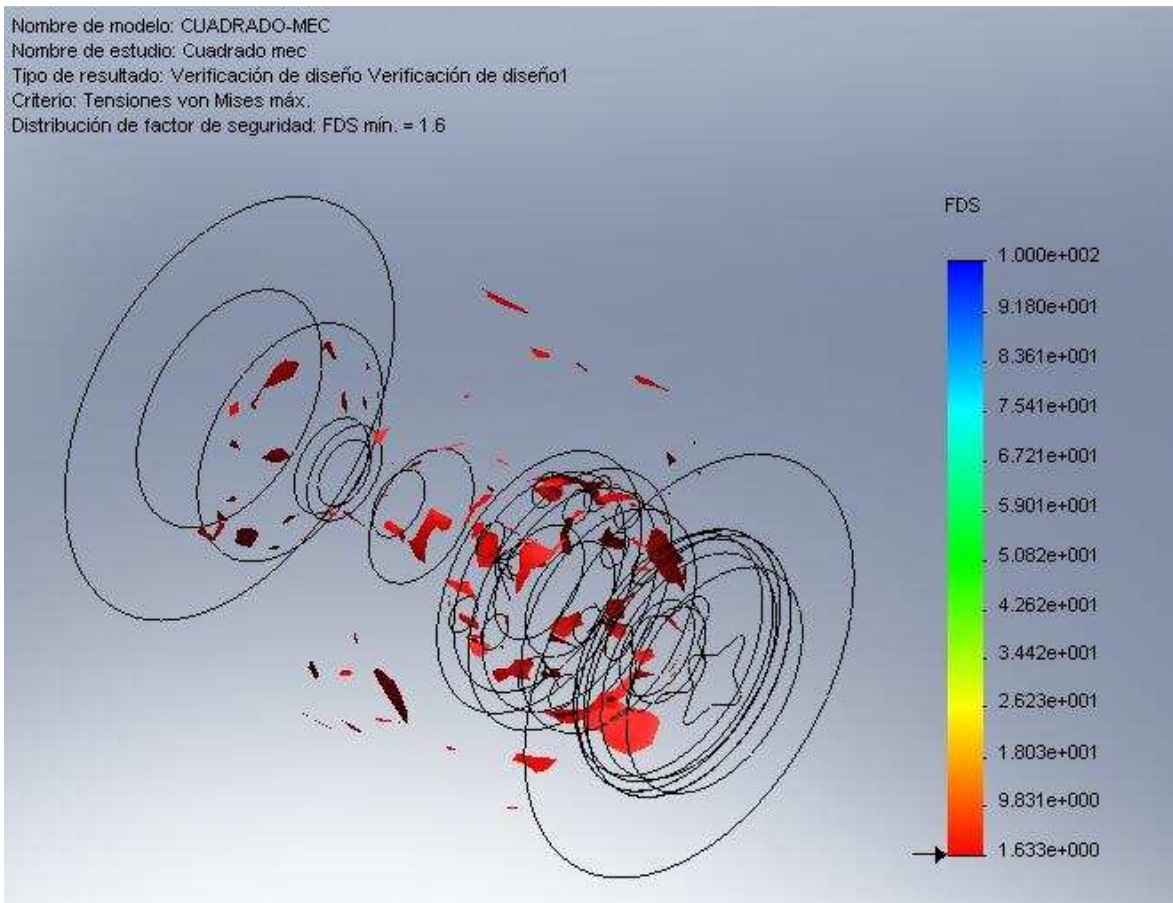


Figura 4.11 ISO superficie de distribución del FS entre 1.6 y 2.2

Tabla 4.3 Variación de esfuerzo y factor de seguridad para distintas temperaturas de funcionamiento molde cuadrado

Rango de temperaturas(C) Salida - entrada	Esfuerzo de Von Mises (MPa)	Factor de seguridad
170 - 180	508	1,63
165 - 175	491	1,66
160 - 170	475	1,68
155 - 165	459	1,71
150 - 160	442	1,74
145 - 155	426	1,77
140 - 150	410	1,82
135 - 145	393	1,87

REFERENCIAS

FIGURAS

4.1 [http:temperatura_5185.pdf](http://temperatura_5185.pdf)

TABLAS

4.1 [http:temperatura_5185.pdf](http://temperatura_5185.pdf)

CAPITULO V

CONSTRUCCIÓN DE MOLDES

Con los planos de construcción elaborados, la siguiente etapa es la construcción de los elementos del molde, a continuación se observarán algunas fotos de cómo se fue elaborando las piezas del molde.

5.1. TORNEADO

Para todas las piezas del molde se utilizó el mismo material, es así que para el trompo, la cámara de almacenamiento y las boquillas se compró un eje de acero AISI 1045 de 3" de diámetro y 200 mm de longitud como se muestra en la Figura 5.1, posteriormente a este se lo dividiría en las secciones necesarias para cada parte del molde



Figura 5.1 Eje de acero AISI 1045

Al total del eje se lo desbaste hasta obtener el diámetro requerido de 65 mm, luego de realizar este procedimiento se seccionó al eje en las distancias necesarias



Figura 5.2 Torneado



Figura 5.3 Verificación de medidas

Con el diámetro uniforme y las longitudes requeridas se procedió a la maquinación individual de cada pieza del molde

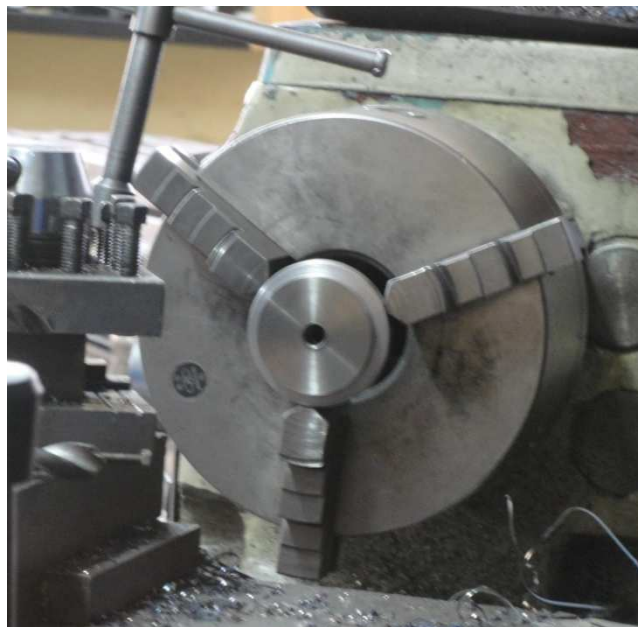


Figura 5.4 Primera fase de torneado para la boquilla

A medida en que se va maquinando la pieza es necesario revisar que las medidas son las especificadas en el diseño previamente realizado como muestra la Figura 5.5.



Figura 5.5 Revisión de medidas

El maquinado de las piezas se lo realizará casi en su totalidad en el torno, la pieza terminada que obtendremos del torno es la cámara de relajación como se observa en la Figura 5.6, en la que únicamente se debe realizar trabajo de desbaste interno.



Figura 5.6 Cámara de almacenamiento



Figura 5.7 Cámara de relajación

Posterior a la realización de los conos y desbaste requerido en esta pieza se deberá taladrar los diámetros especificados en los planos como muestra la Figura 5.8.



Figura 5.8 Perforaciones del torpedo

Finalmente las boquillas después de ser maquinadas en el torno, son sometidas a la máquina de electro erosión por hilo, para así obtener la forma del diseño establecido; para lo cual se debe hacer un orificio pasante a través de la boquilla como muestra la Figura 5.9.



Figura 5.9 Cámara de descarga

5.2. PROCESO DE ELECTROEROSIÓN

A continuación se detallará en qué consiste el procedimiento de electro erosión por hilo, además se detallará paso a paso como se logró obtener la forma deseada de las boquillas.

Primero se debe realizar el plano de lo que se desea obtener en Autocad, se debe alinear el centro del dibujo a las coordenadas 0,0 pues estas son las coordenadas con las que se deberá centrar la pieza en la máquina para posteriormente realizar el corte.

Se debe tener en cuenta que el espesor del hilo de tungsteno que se va a usar es de 0,1 mm, es por eso que se deberá disminuir este valor en el plano, para obtener el valor diseñado, en el molde.



Figura 5.10 Hilo de tungsteno

El hilo parte desde la coordenada 0,0 y sigue un camino que al final debe terminar en la coordenada 0,0 de no hacer esto la máquina realizará la misma secuencia hasta que se la apague, es por eso que se debe dar una coordenada inicial y la misma debe ser la final.

El archivo en el que se debe guardar el plano del corte que se desea obtener es en DXF, posteriormente se lo cargara y se lo guardara en la máquina; a continuación se puede apreciar como se observa el archivo guardado en la máquina de electro erosión como muestra la Figura 5.11.



Figura 5.11 Archivo en maquina de electroerosión

El amperaje de la maquina depende del espesor, del tipo de material y del acabado que se desea obtener, en este caso el amperaje es de 6.



Figura 5.12 Archivo del plano de fabricación cargado el maquina de electroerosión

Después de cargar el plano en la computadora de la máquina como muestra la Figura 5.12, se procede a colocar la pieza que se desea cortar en la máquina, para esto lo primero que se debe hacer, es sacar el hilo de la máquina para que este pase por medio de la pieza que vamos a maquinar, se debe tener cuidado y asegurar de que cuando se coloque el hilo nuevamente este pase por los rodillos de la máquina.



Figura 5.13 Colocación del hilo

A continuación se debe centrar la pieza de tal manera que el hilo quede en el centro de la pieza a maquinar, pero primero debemos asegurarnos de que el hilo quede totalmente perpendicular a la cara de la pieza, después de centrar la pieza se procede a encender la función de corte y se deja que la máquina realice este.



Figura 5.14 Proceso de centrado en la máquina de electro erosión

Para enfriar el hilo se utiliza un aceite degradable, que es amigable con el medio ambiente.

El proceso de electro erosión por hilo nos permite realizar un corte total de la pieza, con formas previamente establecidas, al finalizar este proceso se puede apreciar la forma en que quedaron las boquillas como muestra la Figura 5.15

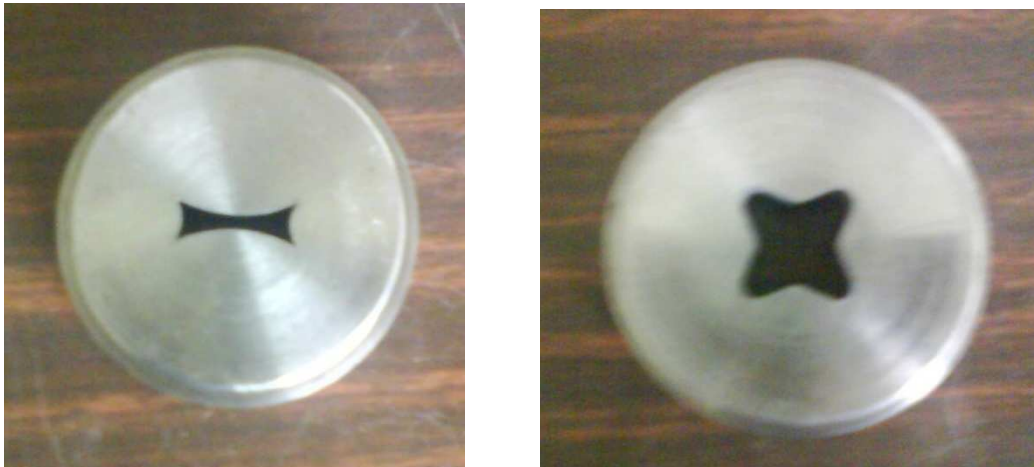


Figura 5.15 Corte de las boquillas por electro erosión

5.3. FRESADO

Por último para obtener la cámara de descarga en la boquilla se deberá usar la fresadora, con avance manual.



Figura 5.16 Proceso de fresado

El desbaste realizado con la fresadora, nos dará un acabado superficial con rugosidades, como se muestra en la Figura 5.17.



Figura 5.17 Boquillas después del desbaste con la fresadora

Cabe señalar que, las boquillas y el trompo poseen un ajuste forzado ligero de $62,5H7 - (50 + 30 + 0)$, se eligió este tipo de ajuste debido a la necesidad de dar mantenimiento y cambiar las boquillas constantemente.

CAPITULO VI

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

6.1. PREPARACIÓN DE MATERIA PRIMA

Para realizar las pruebas y obtener buenos resultados es importante la calidad de la materia prima para lo cual se debe escoger, limpiar, moler, lavar y secar.

Clasificación.- Se escogió utilizar polietileno de baja densidad el cual se encuentra en envases de leche, agua y polietileno de alta densidad que se encuentra en envases de detergentes, aceites de motor y shampoo.

Limpieza.- Se debe retirar todos los residuos de líquidos que estaban contenidos en los envases, además retirar las tapas y etiquetas ya que estos elementos tienen otra composición.

Molienda.- Una vez que el material se encuentra sin elementos extraños se procede a granularlo con el fin de tener partículas de aproximadamente 0.5 cm, las cuales son aptas para el funcionamiento correcto del tornillo. Además el tamaño de las partículas es acorde con el diámetro de alimentación que es de 7 cm.

Lavado.- Ya granulado el material se tiene que lavarlo con detergente y abundante agua, es recomendable dejar actuar al detergente por varias horas, este procedimiento se debe repetir al menos dos veces, para obtener un compuesto más limpio y así mejores resultados.

Secado.- El secado se lo realizará en 2 etapas: La primera etapa de secado se la realizará en un ambiente abierto con exposición directa al sol, durante al menos dos días. Posterior a este, el secado del plástico se lo realiza en una secadora de

aire caliente, durante 30 min, 1500 gr y a 15 C la niquelina, este proceso es muy importante ya que cualquier residuo de agua puede afectar al proceso; para que el secado se lo realice de buena forma se debe mezclar continuamente. También es importante secar la cascarilla de arroz la cual se lo realiza durante 20 min, 200 gr y a 10 C la niquelina. Una vez realizado este proceso la materia prima esta apta para realizar el proceso de extrusión y obtener tanto perfiles rectangulares como cuadrados.

6.2. MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

Previo a realizar las pruebas de funcionamiento se debe realizar un mantenimiento de la máquina para observar, limpiar, analizar y si es necesario corregir cualquier anomalía del equipo.

- El primer paso es el desmontaje de la tolva, tapa del cilindro que contiene el tornillo y la tapa de las catalinas.



Figura 6.1 Desmontaje carcasa de la extrusora

- Es segundo paso es retirar la cadena, para lo cual se debe aflojar los pernos que sujetan el motor y también retirar los pernos que sujetan la rueda-rodamiento-tornillo al armazón del equipo.



Figura 6.2 Desmontaje partes de la extrusora

- El tercer paso es retirar el tornillo del cilindro con mucho cuidado para evitar el roce excesivo con otras partes metálicas.



Figura 6.3 Desmontaje tornillo del cilindro

Cabe señalar que al retirar el tornillo se puede observar claramente las zonas en las cuales el plástico todavía tiene forma granulada y posteriormente pasa a ser un flujo plástico ya que se encontraban adheridas al tornillo partículas de material de ensayos anteriores.

- El cuarto paso es la limpieza de impurezas adheridas al tornillo



Figura 6.4 Limpieza del tornillo

- El quinto paso es la lubricación del rodamiento



Figura 6.5 Lubricación del rodamiento

- El sexto paso es el montaje de las partes de la extrusora incluyendo el molde tanto para perfil rectángulo como para cuadrado y realizar una prueba preliminar de funcionamiento.

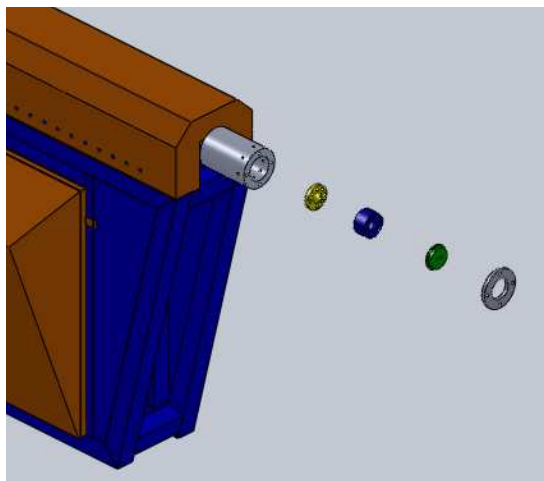


Figura 6.6 Montaje del molde

Tabla 6.1 Prueba preliminar de funcionamiento



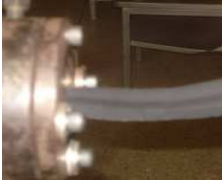

ENSAYO 1 - rectángulo						
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	Tsalida(°C)	Dimensiones		Fotografías
				A la salida (mm)	Enfriado al ambiente(mm)	
170	175	25	139	10,50 x 27	7,30 x 23,5	
166	175	45	121	9,80 x 26,50	7,70 x 25	
Desconectado calefactor de la boquilla						
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	Tsalida(°C)	Dimensiones		
				A la salida (mm)	Enfriado al ambiente(mm)	
170	165	45	107	9,2 x 24	6,80 x 20,4	
165	165	60	133	9 x 28	7,5 x 26,5	
155	160	60	137	8,5 x 27	7,3 x 24,5	

Tabla 6.1 Prueba preliminar de funcionamiento (Continuación)

ENSAYO 1 - cuadrado						
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	Tsalida(°C)	Dimensiones		Fotografías
				A la salida(mm)	Enfriado al ambiente(mm)	
165	160	25	200	29,80 x 23,40	26,50 x 21,50	
150	160	35	189	29,30 x 23.30	27 x 25	
Desconectado calefactor de la boquilla						
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	Tsalida(°C)	Dimensiones		
				A la salida(mm)	Enfriado al ambiente(mm)	
165	165	60	146	27,5 x 24,50	24,50 x 20,50	
155	160	60	140	28,20 x 23,50	27,30 x 21,50	

Observaciones:

- Cuando el material empieza con el proceso de extrusión se produce distorsiones bruscas a medida que va saliendo a través del molde pero esto dura de 5 a 7 cm.



Figura 6.7 Distorsiones a la salida de la boquilla

- A medida que se va enfriando, se producen contracciones o distorsiones de material que dependen de la superficie donde se coloque las probetas.

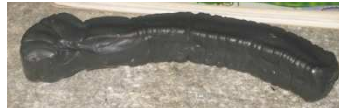


Figura 6.8 Contracciones del material extruido

- Se producen más irregularidades en la sección del perfil cuadrado a medida que aumenta su longitud.



Figura 6.9 Irregularidades a la salida del molde

- El perfil rectangular es más uniforme a medida que aumenta su longitud

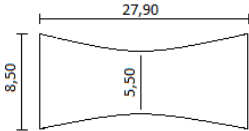

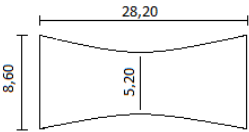

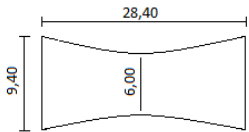

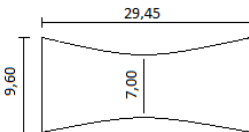



Figura 6.10 Variación del perfil rectangular

6.3. PROTOCOLO DE PRUEBAS

El segundo ensayo que se va realizar es variando la frecuencia y el tipo de enfriamiento a la salida del molde:

Tabla 6.2 Variación de la frecuencia y tipo de enfriamiento

ENSAYO 2 - rectángulo						
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida(°C)	Dimensiones	Fotografías
170	180	15	22	152		Enfriado al ambiente 
170	180	20	30	155		Enfriado al ambiente 
170	180	25	36	153		Enfriado al ambiente 
170	180	30	46	156		Enfriado al ambiente 

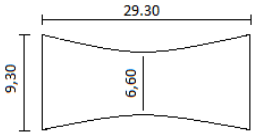



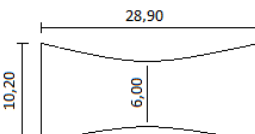
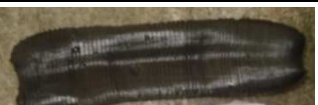
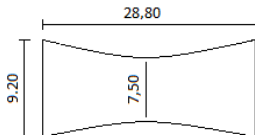

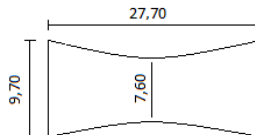

170	180	35	53	154		Enfriado al ambiente 
170	180	40	60	170		Enfriado al ambiente 
170	180	40	60	170		Enfriado por agua 

Tabla 6.2 (continuación)

ENSAYO 2 - rectángulo						
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida(°C)	Dimensiones	Fotografías
170	180	45	66	181		Enfriado al ambiente 
170	180	45	66	181		Enfriado por agua 

170	180	50	74	193		<p>Enfriado al ambiente</p>
170	180	50	74	193		<p>Enfriado por agua</p>
170	180	55	82	180		<p>Enfriado al ambiente</p>
170	180	55	82	180		<p>Enfriado por agua</p>
170	180	60	91	175		<p>Enfriado al ambiente</p>
170	180	60	91	175		<p>Enfriado por agua</p>

Observaciones:



- Al ser enfriado con agua se produce una contracción en el centro del perfil y distorsión en los extremos; se produce un perfil en forma de trapecio.



Figura 6.11 Comportamiento del material extruido al ser enfriado con agua

- Al ser enfriado sobre madera se produce contracciones menores que al ser enfriado sobre mármol en el centro del perfil.

Tabla 6.3 Comportamiento del material a la superficie de enfriamiento

MADERA	MARMOL
	
Conductividad termica = 0.209 W/m°k	Conductividad termica = 2.09 W/m°k
Difusividad termica = 0.103 m ² /s	Difusividad termica = 0.991 m ² /s

Al tener el mármol 10 veces mayor capacidad de conducir calor, hace que el material extruido se enfrié más rápidamente produciendo mayores contracciones;

además el mármol tiene mayor rapidez para variar su temperatura ante una solicitud térmica.

- El aumento de velocidad reduce el espesor de las franjas

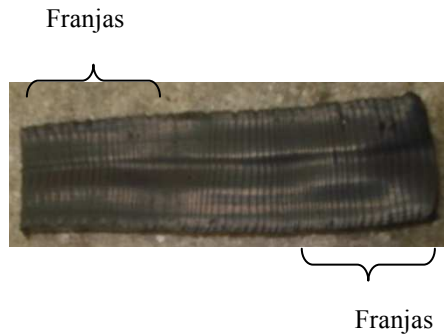


Figura 6.12 Franjas del material extruido

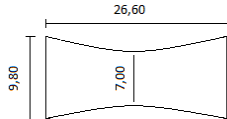

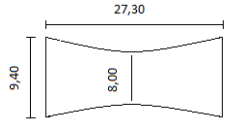

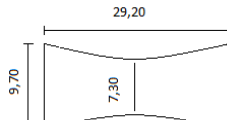

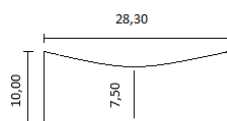

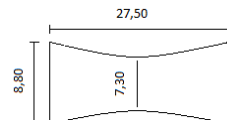

- Cuando se enfría bruscamente se produce contracciones en la parte central y disminuye su sección.



Figura 6.13 Comportamiento del material al enfriamiento brusco

Para el ensayo 3 y 4 se va a variar la temperatura en la entrada y salida del extrusor

Tabla 6.4 Variación de la temperatura de entrada y salida

ENSAYO 3 - rectángulo						
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida(°C)	Dimensiones	Fotografías
160	170	50	74	164		Enfriado al ambiente
						
160	170	60	91	172		Enfriado al ambiente
						
150	160	40	60	158		Enfriado al ambiente
						
150	160	50	74	163		Enfriado al ambiente
						
150	160	60	91	165		Enfriado al ambiente
						

Observaciones:

- Se encontraron incrustaciones metálicas pequeñas.



Figura 6.14 Incrustaciones en el material extruido

- El plástico al extruirse con la boquilla rectangular tiene una inclinación hacia la izquierda



Figura 6.15 Inclinación del perfil en el proceso de extrusión

- Al disminuir la temperatura mejora la uniformidad de las franjas que se producen





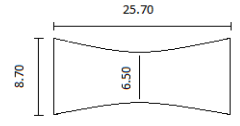

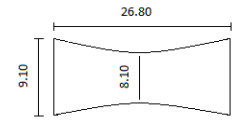

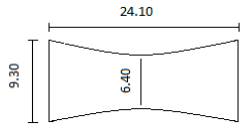

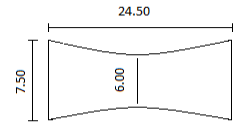

Figura 6.16 Uniformidad en el perfil

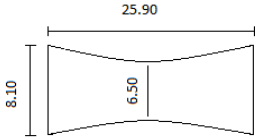

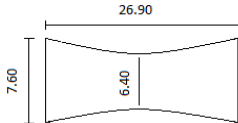

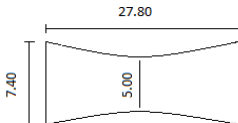

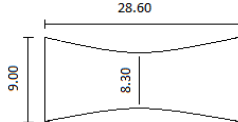

- Con $T_1=160\text{ C}$ y $T_2=170\text{ C}$ se obtuvo buenos perfiles con menores contracciones en la parte central y menores distorsiones en los extremos.



Figura 6.17 Contracciones del perfil extruido

Tabla 6.5 Variación de la temperatura de entrada y salida

ENSAYO 4 - rectángulo						
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida(°C)	Dimensiones	Fotografías
150	160	20	30	152		Enfriado al ambiente
						
150	160	40	60	135		Enfriado al ambiente
						
150	160	60	91	140		Enfriado al ambiente
						
140	150	20	30	120		Enfriado al ambiente
						
140	150	40	60	128		Enfriado al ambiente
						

140	150	60	91	124		<p>Enfriado al ambiente</p> 
130	140	20	30	125		<p>Enfriado al ambiente</p> 
130	140	40	60	128		<p>Enfriado al ambiente</p> 
130	140	60	91	132		<p>Enfriado al ambiente</p> 

Observaciones:

- Mejores resultados con T1=150 y T2=160 con franjas continuas y menores contracciones en el centro del perfil.
- Al momento de calentar el material dentro del molde empieza a tener flexibilidad a 140 C

Para el ensayo 5 se va a medir el flujo másico al variar la temperatura; hay que tomar en cuenta que este flujo es medido al momento que es continuo, ya que el proceso realmente tiene varias interrupciones.

Tabla 6.6 Variación del flujo másico perfil rectangular

ENSAYO 5 - rectángulo							
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida (°C)	Flujo másico (g/min)	Promedio (g/min)	Kg/h
170	180	20	30	174	7.0	7,1	0,43
					7.2		
					7.1		
170	180	40	60	175	18.0	20	1,2
					16.0		
					26.0		
170	180	60	91	179	26.0	26	1,56
					23.0		
					28.5		
160	170	20	30	155	10.0	9.5	0,57
					9.0		
					9.5		
160	170	40	60	157	12.0	12.8	0,77
					14.5		
					12.0		
160	170	60	91	161	15.0	15.7	0,94
					16.0		
					16.0		
150	160	20	30	152	4.0	5.0	0,30
					5.0		
					6.0		

Tabla 6.6 (continuación)

ENSAYO 5 - rectángulo							
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida (°C)	Flujo másico (g/min)	Promedio (g/min)	Kg/h
150	160	40	60	135	9.5	9.7	0,58
					11.0		
					8.5		
150	160	60	91	140	12.0	14.3	0,86
					15.0		
					16.0		
140	150	20	30	120	1.5	2.2	0,13
					3.0		
					2.0		
140	150	40	60	128	6.0	4.7	0,28
					5.0		
					3.0		
140	150	60	91	124	11.0	9.7	0,58
					9.0		
					9.0		
130	140	20	30	125	3.0	2.5	0,15
					2.5		
					2.0		
130	140	20	30	128	4.0	3.3	0,20
					2.5		
					3.5		
130	140	20	30	132	5.0	3.7	0,22
					3.0		
					3.0		

La siguiente grafica muestra la variación del flujo en función de la frecuencia a diferentes rangos de temperatura:

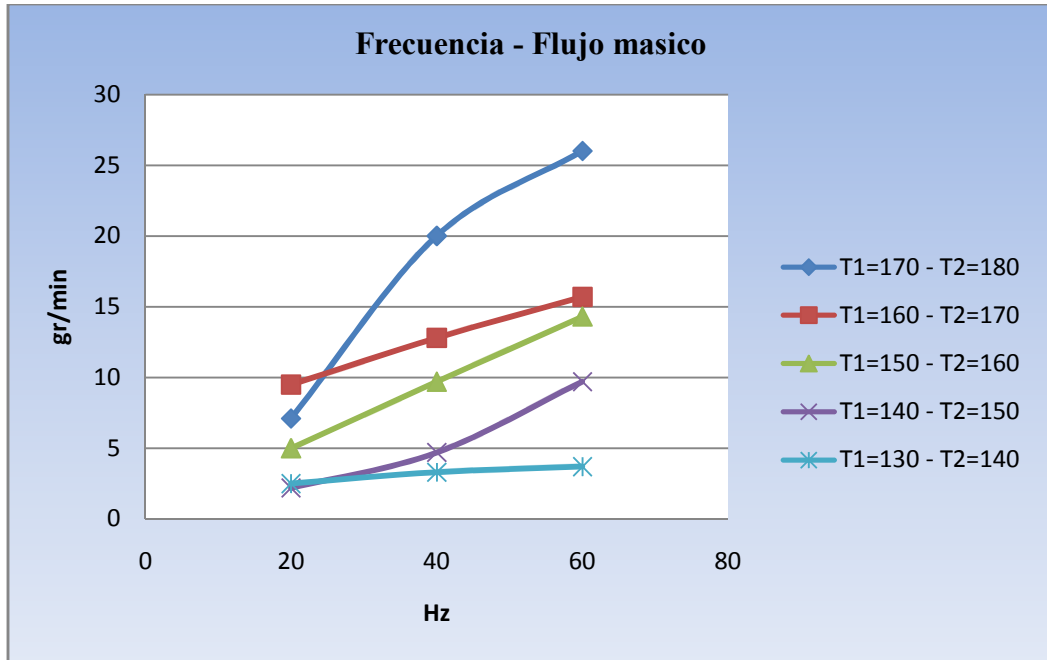


Figura 6.18 Frecuencia – Flujo másico perfil rectangular

Observaciones:

- Al llegar a la temperatura de 140°C e inferiores no existe flujo continuo de material y esto ocasiona variaciones de sección e hinchamiento muy notables en las muestras.
- Ya que el ambiente dentro del molde y cilindro se encuentra caliente, el fluido va ganando temperatura y al alcanzar la temperatura adecuada para fluir, sale de manera intermitente a temperaturas inferiores a 140 °C.
- Se produce un sonido agudo que suponemos es producido por la masa de plástico no fundido que se adhiere al tornillo y roza con el cilindro. Esto se produce a una temperatura de 120 °C.

Para el ensayo 6 se va incluir fibras (cascarilla de arroz), variando la temperatura y frecuencia que dio los mejores resultados en los ensayos anteriores.

Tabla 6.7 Proceso de extrusión de plástico mas fibras perfil rectangular

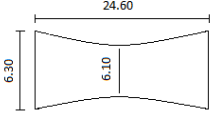

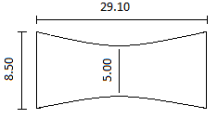

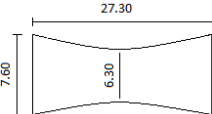

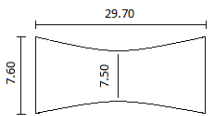

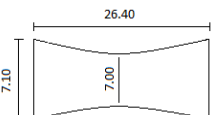

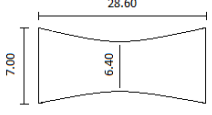

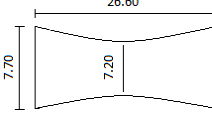

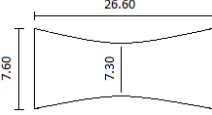

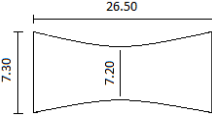

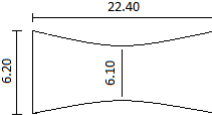

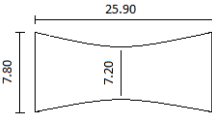

ENSAYO 6 - rectángulo								
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida(°C)	Masa(gr)		Dimensiones	Fotografías
					Plástico	Fibras		
170	180	40	60	178	80	20	Sin forma definida	
160	170	40	60	168	95	5		
160	170	40	60	163	97	3		
160	170	40	60	166	99	1		
150	160	30	46	155	98	2		
150	160	30	46	161	99	1		

Tabla 6.7 (continuación)

ENSAYO 6 - rectángulo								
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida(°C)	Masa(gr)		Dimensiones	Fotografías
					Plástico	Fibras		
150	160	40	60	161	98	2		
150	160	40	60	143	99	1		
140	150	30	46	152	98	2		
140	150	30	46	150	99	1		
140	150	40	60	149	98	2		
140	150	40	60	150	99	1		

Observaciones:

- Al realizar una mezcla de 20% fibras con 80% de plástico para el proceso de extrusión se obtuvo un perfil sin forma definida y con muy poca consistencia, además se producía un olor muy desagradable al quemarse las cascarilla de arroz
- Se disminuyó la proporción de fibras en la mezcla, con un 5% de fibras y 95% de plástico se obtuvieron perfiles extruidos con pequeñas porosidades, sección sin orificios, con pequeñas contracciones y mejoró de alguna manera la consistencia.
- Con mezclas que contienen proporciones de fibras menores al 5% mejora la sección en el centro del perfil
- Para una relación de volumen 1 a 1 existe una relación de masa de plástico 3 veces mayor a la de las fibras
- Se obtuvo un perfil uniforme con la proporción de 1% de fibras y 99% de plástico, aunque se mantienen pequeñas imperfecciones en la superficie
- Con las fibras se pierden las líneas de extrusión pero existen excesos de material en los lados del perfil
- A una temperatura de $T_1=140$, $T_2=150$, $f=30\text{hz}$ existen incrustaciones y/u orificios a lo largo del perfil, además no hay flujo continuo y al momento de fluir lo hace por tramos cortos
- A una temperatura de $T_1=140$, $T_2=150$, $f=40\text{hz}$ existen ondulaciones en la parte central del perfil y hay mayor presencia de rebabas de material extruido

Para los ensayos del perfil cuadrado se va descartar los ensayos en los cuales para el perfil rectangular no tuvieron buenos resultados, para poder tener resultados claros con los mejores parámetros de funcionamiento.

Para el primer análisis del perfil cuadrado se va variar la frecuencia y se va mantener la temperatura de entrada y salida del molde constante.

Tabla 6.8 Variación de la frecuencia y temperatura constante

ENSAYO 7 - cuadrado						
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida(°C)	Dimensiones	Fotografías
170	180	30	46	167		
170	180	40	60	180		
170	180	50	74	183		
160	170	30	46	174		
160	170	40	60	179		

160	170	50	74	173		
155	160	30	46	151		
155	160	40	60	157		
155	160	50	74	161		

Observaciones:

- Tarda muy pocos minutos en enfriarse y de esta manera mantiene su forma
- Existe porosidades y discontinuidades en las esquinas del perfil
- Al aumentar la frecuencia disminuye las porosidades y aparecen las franjas propias del proceso de extrusión sin fibras

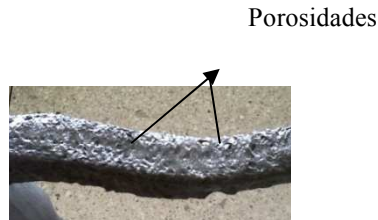


Figura 6.19 Porosidades del material extruido

- A $T_1=155$, $T_2=160$ y $f=30$ Hz hay flujo intermitente
- Existe hinchamiento en el centro del perfil y el material presenta memoria del proceso de extrusión a través de la boquilla por lo que se produce ondulaciones en las esquinas al momento de enfriarse; además la sección adquiere una forma trapezoidal.



Figura 6.20 Forma del material extruido

Se determino el flujo másico del perfil cuadrado al variar la temperatura y frecuencia, tomando en cuenta los mejores parámetros obtenidos en ensayos anteriores.

Tabla 6.9 Variación del Flujo másico perfil cuadrado

ENSAYO 8 - cuadrado							
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida (°C)	Flujo másico (g/min)	Promedio (g/min)	Kg/h
170	180	30	46	167	14,0	11,0	0,66
					10		
					9,0		
170	180	40	60	180	17,0	20,3	1,22
					19		
					25,0		
170	180	50	74	183	21,0	22,7	1,36
					23		
					24,0		
160	170	30	46	174	11,0	12,3	0,74
					7		
					19,0		
160	170	40	60	179	19,0	16,2	0,97
					11,5		
					18,0		
160	170	50	74	173	17,0	18,0	1,08
					23		
					14,0		
155	160	30	46	151	8,0	7,2	0,43
					4,5		
					9,0		
155	160	40	60	157	6,0	9,0	0,54
					9,5		
					11,5		
155	160	50	74	161	11,0	11,0	0,66
					15,0		
					7,0		

La siguiente grafica muestra la variación del flujo en función de la frecuencia a diferentes rangos de temperatura:

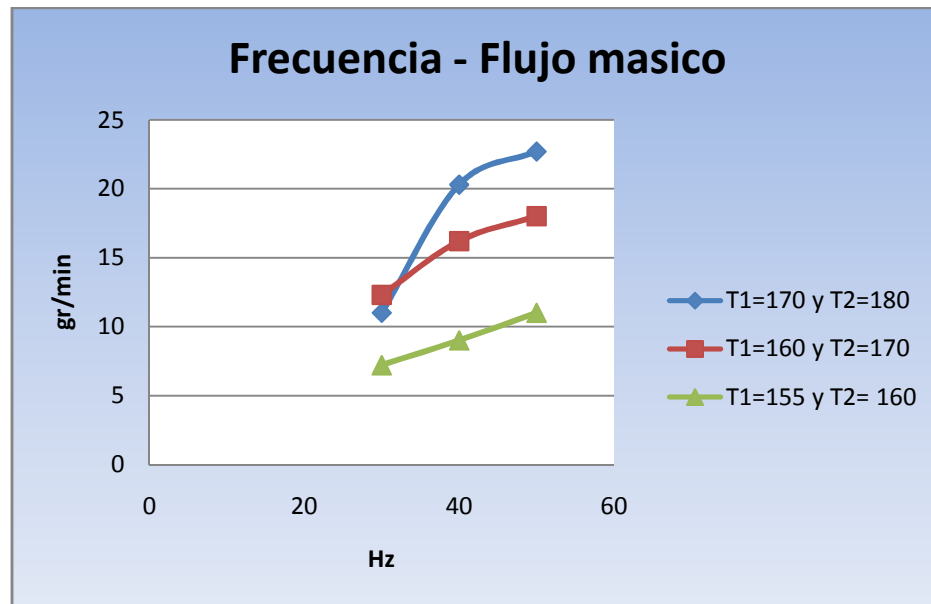


Figura 6.21 Frecuencias – flujo másico perfil cuadrado

Observaciones:

- Al aumentar la frecuencia y/o la temperatura mejora la planimetría en las caras del perfil debido a que se producen franjas mas seguidas.
- A menor frecuencia se obtiene la sección cuadrada más definida.



Figura 6.22 Forma de la sección cuadrada extruida

Para el ensayo 9 se va incluir fibras (cascarilla de arroz) en 1 y 2%, variando la temperatura y frecuencia que dio los mejores resultados en los ensayos para perfil rectangular.

Tabla 6.10 Proceso de extrusión de plástico mas fibras perfil cuadrado

ENSAYO 9 - cuadrado								
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida(°C)	Masa(gr)		Dimensiones	Fotografías
					Plástico	Fibras		
170	180	30	46	174	99	1		
170	180	40	60	179	99	1		
170	180	50	74	187	99	1		
160	170	30	46	165	99	1		
160	170	40	60	173	99	1		
160	170	50	74	170	99	1		

Observaciones:

- Al colocar fibras al 1% se forman grietas y se demora más tiempo en enfriarse, lo cual a bajas frecuencias produce deformaciones en la sección transversal
- Aumenta la magnitud de los lados del cuadrado al aumentar la frecuencia
- Al aumentar la temperatura a 170 C y con baja frecuencia existe mayor sección transversal e hinchamiento pero al aumentar la frecuencia la sección en más uniforme y menos porosidades.
- Existe porosidades debido a la inconsistencia del material y es fácilmente deformable.
- Al llegar a una frecuencia de 50 Hz y temperatura alta existen burbujas de aire en las paredes del material extruido.



Figura 6.23 Burbujas en el proceso de extrusión

Para el ensayo 10 se quiere determinar los tiempos de transición, consumo y total.

- t-transición: tiempo hasta que empezó a salir el material extruido
- t-consumo: tiempo en el que se consumió el material en la tolva
- t-total: tiempo hasta que todo el material fue extruido

Tabla 6.11 Tiempos en el proceso de extrusión

ENSAYO 10 - cuadrado								
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	Masa Entrada (gr)	Tiempo transición (seg)	Tiempo consumo (min)	t-total (min)	Masa salida (gr)	Longitud (cm)
160	170	30	100	59	8,7	12	96	26
		40		43	6,5	10	94	24,5
		50		36	4,5	7	96	24

Observación:

- Con fibras el material compuesto se demora más tiempo para obtener el perfil mediante el proceso de extrusión. Por ejemplo a una temperatura de entrada de 170 C y de salida de 160 C se demora en extruir 100 gr de plástico 7 min pero al extruir 99 gr de plástico más 1 gramo de fibras se demora 13 min.

Para comprobar la forma que deben tener las boquillas para conseguir ciertos perfiles como lo dice en el libro de Morton-Jones, se construyo una boquilla con la cámara de descarga recta; y de esta forma conocer el comportamiento del material a través de este tipo de boquillas.

Tabla 6.12 Proceso de extrusión con boquilla de paredes rectas

ENSAYO 11 - cuadrado						
T1(°C)	T2(°C)	f(Hz)	RPM	Tsalida(°C)	Dimensiones	Fotografías
160	170	30	46	180		
160	170	40	60	177		
160	170	50	74	174		
150	160	30	46	174		
150	160	40	60	170		
150	160	50	74	172		

Observación:

- Se pudo observar que al tener una boquilla con las paredes totalmente rectas, al momento de extruir se produce un hinchamiento que provoca que el perfil sea circular, por lo que siempre se debe estimar la variación que va tener el perfil extruido al pasar por la boquilla.

6.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar los resultados se debe conocer las razones y las variables que han influido en los ensayos, para determinar si están dentro de los parámetros de diseño y funcionamiento.

Reología en el proceso de extrusión:

La presión desarrollada, dependerá de la viscosidad, el flujo constante y uniforme del material. Se puede considerar 4 puntos para poder detectar la base de los problemas de extrusión:

- Problemas de plastificación
- Problemas de mezclado y contaminación
- Problemas de desgaste
- Problemas de flujo

Problemas de plastificación:

La deficiencia en la plastificación del material da origen a la fractura del fundido y degradación del material con el consecuente amarillamiento y puntos negros, lo cual depende tanto del equipo como de la materia prima, pero este problema no

se presenta en el diseño del molde ya que la salida del molde es ahusada; eliminando puntos muertos y reduciendo esfuerzos.

Problemas de mezclado y contaminación:

Es fundamental tener un material perfectamente homogéneo y compatible en todos sus componentes para tener una extrusión eficiente además de no sobre aditivar con cargas y fibras, lo cual se ha logrado utilizando polietileno de alta y baja densidad perfectamente granulado y secado con un porcentaje de fibras adecuado; de esta manera se evita los siguientes problemas:

- Ráfagas
- Mala dispersión
- Bajas propiedades mecánicas

Problemas de desgaste:

El desgaste es propio del proceso (movimiento). Se puede producir desgaste prematuro con el uso de:

- Cargas abrasivas que se tomaron en cuenta al no sobrecargar la maquina tanto en régimen de velocidad como tiempo de uso.
- No se colocó materiales contaminantes abrasivos ya que se realizó una inspección minuciosa del material granulado
- Se procuró no tener malas condiciones de operación; al menor ruido se paró la maquina y se procedió a revisar, desmontar y arreglar el problema.
- Previo a la utilización del equipo en la etapa de mantenimiento se midió el diámetro del tornillo el cual no había tenido mayor desgaste ya que se lo comparó con los planos de fabricación.

Problemas de flujo:

El flujo del material plástico no es uniforme y constante; este problema no se pudo evitar en su totalidad ya que el material no se funde uniformemente y se producen cavitaciones ya que no hay un mecanismo de alimentación de material constante

VARIABLES DE LOS ENSAYOS:

Para el perfil rectangular se quería obtener rectángulos de 7 x 20 mm y para el cuadrado de 18 x 18 mm, pero variando los parámetros se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- Con temperaturas altas como 170 C a la salida y 180 C en la entrada se consiguen perfiles con dimensiones mayores a las esperadas con un incremento del 50 % en el ancho y un 35% en el alto para el perfil rectangular; mientras que para el perfil cuadrado un incremento del 39% aproximadamente.
- Al aumentar la velocidad del tornillo se reduce las inestabilidades a la salida del molde que se manifiestan como la piel de tiburón (arrugamiento de la superficie), este fenómeno se produce ya que el material fundido avanza con un perfil de velocidad que es máximo en el centro y 0 en la pared, conforme abandona los bordes del molde tiende a acelerarse y esto genera esfuerzos a la tracción y, si el esfuerzo excede la resistencia a la tracción, la superficie se rompe generando el defecto visual.
- Las distorsiones dependen más intensamente de la temperatura, siendo reducido por el decrecimiento de esta.
- El hinchamiento en el molde es el efecto por el cual el polímero recupera las deformaciones elásticas producidas por el efecto de cizalla, el cual tiende a estar dentro de la relación esperada que para el diseño es 1.4 a temperaturas de salida de 150 C y entrada de 160 C. Acompañado de una

frecuencia controlada de 40 a 50 Hz se evita también un excesivo arrugamiento en la superficie.

- Se pudo determinar que el enfriamiento es primordial para mantener la forma luego del proceso de extrusión:
 - Enfriado con agua a temperatura ambiente el perfil tiende a tener muchas deformaciones y esto se debe a un enfriamiento brusco.
 - Enfriado sobre una superficie produce también varias deformaciones y estas deformaciones van a depender del coeficiente de transferencia de calor que tenga la superficie de contacto.
 - Enfriado al ambiente sin contacto con alguna superficie se obtienen los mejores resultados ya que se produce un enfriamiento paulatino ya que el material transfiere calor por convección al ambiente.
- Las contracciones producidas luego del proceso de enfriamiento al ambiente tienen los siguientes valores:
 - Perfil rectangular: Contracción en el espesor del 80.8% y contracción longitudinal/transversal del 9.5%.
 - Perfil rectangular: Contracción en el espesor del 45.9% y contracción longitudinal/transversal del 7.7%.
- Para realizar un proceso de extrusión adecuado con este tipo de polímeros y tener flujo continuo no se debe reducir la temperatura de operación de 140 C, ya que a temperaturas inferiores el material no fluye y en el equipo se pueden producir daños severos.
- En uno de los ensayos se obtuvo perfiles rectangulares con inclinaciones al lado izquierdo, lo cual era provocado porque la placa rompedora se había movido de su lugar y estaba provocando interferencia en el flujo hacia uno de los lados.
- La relación en volumen 1 a 1 tiene una relación de masa de plástico 3 veces mayor al de las fibras esto implica que el porcentaje de fibras de aporte al polímero para el proceso de extrusión debe ser bajo (1 a 2%); las ventajas son que se pierden las líneas de extrusión, disminuye el

hinchamiento y el perfil es homogéneo mientras que las desventajas son excesos de material en los lados, porosidades y el perfil pierde ductilidad por lo tanto se vuelve frágil

- Si el perfil que se necesita no es circular, los patrones de flujo y las velocidades varían en diferentes sitios, y el hinchamiento en el molde no es igual en todos los puntos. Por eso se tiene que descuadrar el perfil de la boquilla para lograr la forma que se necesita

CAPITULO VII

ANÁLISIS FINANCIERO Y ECONÓMICO

7.1. COSTOS DIRECTOS

7.1.1. PERSONAL

Ord.	Posición	Horas - H	Valor H - H	Valor Total
1	Director del proyecto *	54	20	1080.00
2	Codirector del proyecto *	54	20	1080.00
3	Egresado CIME*	540	3	1620.00
4	Egresado CIME*	540	3	1620.00
			Total 1	5400.00

7.1.2. MATERIA PRIMA PARA ENSAYOS

Ord.	Descripción	Cantidad (Kg)	Valor unitario	Valor Total
1	Desechos plásticos	500	0.30	150
2	Cascarilla de arroz	5	1	5
			Total 2	155

7.1.3. MOLDE PARA PERFIL RECTANGULAR Y CUADRADO

7.1.3.1. Materiales

Ord.	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
1	Eje acero AISI 1045, Φ 3 pulg, 20 cm	1	5 x kg	22.5
2	Cuchilla	1	25	25
3	Broca de 8.5 mm	1	15	15
4	Fresa	1	25	25
			Total 3	87.50

7.1.3.2. Trabajos/mano de obra

Son los costos por el uso de la maquinaria que posee "Engineering center", en esto se incluye el uso de torno, fresadora, taladro, maquina de electroerosión y las herramientas en general de la empresa.

Ord.	Descripción (por hora)	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
1	Trabajo en el torno	5	4	20.00
2	Trabajo en la fresa	3	4	12.00
3	Trabajo en la máquina de electro-erosión	3	15	45.00
4	Trabajo con el taladro	1	3	3.00
5	Trabajo en la moledora	1	6	6.00
6	Trabajo en la secadora	20	3	60.00
7	Trabajo en la extrusora	200	4	1600.00
8	Trabajo de lavado	2	4	8.00
Total 4				115.00

7.1.3.3. Otros costos directos

Ord.	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
1	Compra de programa SolidWorks 2007	1	25	25.00
2	Compra de libro "Procesamiento de plástico" de MORTON-JONES	1	15	15.00
5	Plástico	1	15	15.00
6	Cernidero	1	6	6.00
7	Detergente	3	2.25	6.75
8	Lavacaras	2	4.50	9.00
Total 5				76.75

Resumen costos directos

Total 1	5400.00
Total 2	155.00
Total 3	87.50
Total 4	115.00
Total 5	76.75
Subtotal 1	5834.25

7.2. COSTOS INDIRECTOS

7.2.1. MISCELÁNEOS

Ord.	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
1	Útiles de oficina	1	10	10.00
2	Impresiones	1500	0.04	60.00
3	Movilización, peajes	50	6	300.00
4	Internet	3	20	60.00
Subtotal 2				430.00

Resumen total

Subtotal 1	5834.25
Subtotal 2	430.00
TOTAL GLOBAL	6264.25

7.3. FINANCIAMIENTO

Los valores por la construcción de los moldes para obtener perfiles rectangulares y cuadrados fueron financiados por los egresados de la carrera, el costo neto del molde es de \$ 202.50 el cual es un valor bajo en comparación a los beneficios tanto ambientales como económicos que pueden representar ya que sus aplicaciones son innumerables y puede reemplazar a la madera por sus buenas propiedades mecánicas.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

- Es fundamental tener un material perfectamente homogéneo con polímero granulado de 1 cm y compatible en todos sus componentes para tener una extrusión eficiente además de no sobre aditivar con cargas y fibras (máx. 2%).
- Los mejores resultados en el proceso de extrusión de perfiles rectangulares y cuadrados se obtuvieron en rangos de temperatura en la entrada de 160 a 170 C mientras que a la salida de 150 a 160 C con una frecuencia controlada de 40 Hz.
- La longitud de molde es muy importante para que el material fundido adquiera una forma determinada y se compacte, de tal forma que no sufra cambios bruscos.
- Para obtener perfiles que no son circulares se debe descuadrar el perfil de la boquilla ya que los patrones de flujo, velocidades y por lo tanto el hinchamiento en el molde no es igual en todos los puntos; esto provoca un hinchamiento del 40%.
- El flujo másico es totalmente irregular, pero se determinaron patrones de flujo en intervalos para el perfil rectangular de 0.0015 a -0.0015 Kg/s y para el perfil cuadrado de 0.0003 a - 0.0004 Kg/s, lo cual muestra la discontinuidad del flujo ya que se presentan líneas caóticas que provocan un retroceso del flujo másico.

- El medio de enfriamiento del perfil es fundamental para mantener su forma y propiedades mecánicas, este debe ser un enfriamiento paulatino con el fin de evitar agrietamientos, distorsiones y cambios en su estructura molecular; aunque se pueden obtener buenos resultados al sumergir el perfil en agua en un rango de temperaturas de 70 a 80 C.
- No se puede evitar que el polímero se queme, ya que el tiempo de residencia del material dentro del tornillo hace que se produzca este fenómeno; y si se disminuye la temperatura demasiado, se producirá una sobrecarga del equipo.
- Al no existir un sistema de alimentación continuo, el flujo másico de material extruido es intermitente y produce excesiva residencia del material fundido en el tornillo y dentro del molde. Para condiciones de temperatura de entrada de 170 C y de salida a 160 C, frecuencia constante de 40 Hz se tiene un tiempo de extrusión de 100 gr de plástico granulado en 10 minutos obteniendo un perfil con una longitud de 24.5 cm.
- Al combinar polietileno de alta y baja densidad granulado con fibras (cascarilla de arroz) para el proceso de extrusión, el material extruido pierde ductilidad, ya que al aplicar fuerza perpendicular en los extremos del perfil en una longitud de 10 cm se produce una fractura sin previo aviso con un alargamiento menor al 5%.
- Después de realizar un estudio de los materiales existentes en el medio y con el objetivo de disminuir costos, se selecciono para la construcción del molde el acero AISI 1045 con un tratamiento de temple y revenido, con el fin de lograr características mecánicas que cumplan con los parámetros de funcionamiento requeridos por el diseñador para la boquilla de relajación y

descarga mientras que para el trompo y placa rompedora se utilizo un acero Bohler M201 ya que esta sección está expuesta a mayores esfuerzos.

- Los datos obtenidos sobre el proceso de extrusión de plástico de desecho formado de polietileno de alta y baja densidad van a servir para implementar un sistema de reciclaje de desechos plásticos para obtener madera plástica en perfiles rectangulares y cuadrado.

8.2.RECOMENDACIONES

- Con el fin de mantener la forma del perfil después del proceso de extrusión se recomienda diseñar y construir un sistema de enfriamiento a la salida del molde.
- El secado del plástico granulado en la secadora de aire caliente debe ser a una temperatura máxima de 15 C, a esta temperatura y con un movimiento constante se evita la formación de bolas de plástico que no son aptas para la alimentación de la extrusora.
- Para evitar problemas en la zona de alimentación se debe asegurar, que el material que se introduzca a la tolva este totalmente granulado, ya que de no ser así, estas aglomeraciones de plástico (bolas) impedirán el arrastre del material a través del tornillo a la zona de compresión.
- Para lograr un flujo continuo y evitar que el material se queme se debe disminuir la residencia del material en el tornillo y el molde, esto se logrará teniendo un control de los calefactores en tramos más cortos.
- El proceso de extrusión de polímeros de desecho produce gases contaminantes por lo que el personal debe protegerse con mascarilla y en el lugar de trabajo debe existir una buena ventilación.

- Se debe tomar en cuenta siempre los tratamientos térmicos que se pueden realizar a un material para mejorar sus propiedades de tal forma que se pueda tener un material apto para determinadas condiciones con un costo menor.

BIBLIOGRAFÍA.

- **Morton, Jones.** Procesamiento de Plásticos. Editorial Limusa S.A, México (2004).
- **Brindis, Eleno A.** Propiedades Básicas de los Polímeros, 2002.
- **Incropera, Frank P. y Dewitt David P.** Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ta. Edición, Prentice Hall Hispanoamericana S.A., México (1999).
- **Charles R. Mischke y Joseph E. Shigley.** Diseño en ingeniería mecánica. Editorial McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A de C.V.()
- **Barriga, Jorge L.** Madera Plástica-Pruebas Mecánicas Preliminares, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Perú 20/10/2008.
- **Ing. Pedro Antonio Cedeño.** Venezuela en plástico. Publicación de Plastguia (2001).
- **Frank. White.** Mecánica de fluidos. Editorial Mc Graw Hill, España (2004)
- **Reciclaje de plásticos**
http://www.yolimpio.com/recicla/pdf/4_Reciclaje_del_Plastico_2.pdf
- **Strucplan**
<http://www.estrucplan.com.ar/producciones/entrega.asp?identrega=1065>
- **Textos científicos.**
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/relacion>

- **Inter-empresas**

<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/41361-Como-la-madera-pero-mas-barato.html>

- **Uddeholm**

http://www.uddeholm.com.ar/files/Impax_Supreme_Spa.pdf

- Tutorial Solid Works.

- Catálogo Bohler 2009