

Moldeo Universal™

Método Sistemático de Optimización de Moldeo por Inyección

Héctor Dilán

h_dilan@outlook.com

Héctor Dilán cuidadosamente preparó este libro y entiende que está correcto. El libro y la disciplina de ***Moldeo Universal™*** son una guía general sin garantía alguna. Héctor Dilán no da garantías y no se hace responsable por daños, pérdidas y accidentes como consecuencia del uso de esta disciplina y el contenido del libro.

La reproducción de cualquier parte de este libro sin la autorización del autor está prohibida.

*Héctor Dilán carefully prepared this book, and it is believed to be correct. The book and the **Universal Molding™** discipline provide general guidance with no warranties of any kind. Hector Dilan makes no warranties and disclaims any responsibility or liability of any kind for any loss or damage as a consequence of the use of or reliance upon such information.*

Any reproduction of any part of this book without the written permission of Héctor Dilán is prohibited.

Edición 5

Copyright Héctor Dilán, 2024

Dedicatoria

Le dedico este libro a mi esposa, Susan, por ser el pilar que fortalece cada día de mi vida, por ayudarme con la edición y por prestarme nuestro tiempo familiar para la escritura del mismo.

Agradecimiento

Este libro fue escrito gracias a la motivación de amigos de la industria del plástico. Algunos de estos amigos y colaboradores son: Luis de Jesús, Carlos López, Iván Baigés, Gregorio Vélez, Runny Hernández, William Torres, Wally Cruz y Félix Colón. Amigos, gracias por la colaboración y por compartir sus conocimientos conmigo.

Tabla de Contenido

Figuras.....	8
Prefacio.....	12
Prólogo.....	13
I. Introducción.....	14
¿Qué es <i>Moldeo Universal</i> TM ?	15
Fundamentos del Proceso de Inyección.....	17
II. Parámetros del Proceso de Inyección.....	26
Parámetros de Máquina y Universales.....	27
Parámetros de Inyección.....	28
Parámetros de Transferencia.....	29
Parámetros de Empaque (“Hold”) Endurecimiento de Bebederos.....	30 31
Parámetros de Enfriamiento.....	33
Parámetros de Plastificación.....	34
Movimientos de la Prensa.....	37
Preguntas.....	39
III. Gráficas del Proceso.....	42
Moldeo con Gráficas.....	43
Diagramas PVT.....	53
Preguntas.....	55
IV. Morfología de Plásticos.....	57
Tipos de Plásticos.....	58
Propiedades Mecánicas.....	59
Materiales Comunes y Sus Características.....	61
Encogimiento.....	64
Algunos Experimentos.....	65
Preguntas.....	69
V. Equipos Auxiliares.....	71
Secado de Materiales.....	72
Aire extremadamente seco.....	73
Temperatura de secado.....	73
Flujo de secado.....	74
Tiempo de secado.....	75
Componentes del equipo de secado.....	75
Tolva secadora.....	76
Tamaño de la tolva secadora.....	77
Tiempo de secado.....	78
Densidad granel.....	78
Cargador de resina.....	80
Secadora.....	80
El filtro.....	81
Bomba (“blower”).....	81
Recámara secante.....	82

Resistencia de calor.....	83
Regeneración.....	84
Configuración de sistemas de secado.....	86
Preguntas.....	95
Dosificación y Manejo de Materiales.....	99
Centro de mezclado.....	105
Preguntas.....	106
Control de Temperatura de Agua al Molde.....	107
Consumo de Material.....	107
Calor removido.....	108
Flujo de agua.....	110
Tiempo de Enfriamiento Estimado.....	115
Control de Temperaturas (TCU).....	117
TCU con enfriamiento directo.....	118
TCU con enfriamiento y calentamiento directo.....	119
Preguntas.....	124
VI. Moldeo Desde el Escritorio.....	125
Cálculos de la Prensa.....	126
Fundamentos de la fuerza de cierre.....	127
Área Proyectada.....	128
Cálculo de Pared Fina.....	133
Fuerzas resultantes de mecanismos que accionan lateralmente.....	137
Moldes de tres platos.....	140
Molde doble (“ <i>stack mold</i> ”).....	141
Espacio de la prensa en máquinas con barras (“ <i>tie bars</i> ”).....	142
Espacio de la prensa en máquinas sin barras (“ <i>tiebarless</i> ”).....	143
Apertura máxima y mínima.....	144
Patrón de expulsores.....	145
Preguntas.....	146
Cálculos de la Unidad de Inyección.....	147
Tamaño de la unidad de inyección.....	147
Punta de la boquilla (“ <i>nozzle tip</i> ”) y el casquillo (“ <i>sprue bushing</i> ”).....	149
Densidad y densidad específica.....	155
Velocidad de inyección y flujo de inyección.....	155
Utilización del barril.....	157
Posición de plastificación.....	159
Densidad de descarga.....	160
Velocidad de plastificación.....	162
Tiempo de residencia.....	163
Posición de transferencia.....	166
Resumen.....	169
Perfiles de temperatura.....	170
Procedimiento para medir la temperatura del fundido.....	172
La contrapresión (“ <i>back pressure</i> ”).....	173
Razón de intensificación (R_i).....	174
Rotulación de maquinaria.....	175
Preguntas.....	176

VII. Reología en Máquina.....	180
Flujo de Plástico Fundido.....	181
Esfuerzo Cortante, Viscosidad y Velocidad Cambiante.....	181
Reología en Máquina por Potencia.....	185
Reología en Máquina por Viscosidad.....	187
Reología Aproximada.....	191
Ecuación de Predicción del Tiempo de Inyección.....	198
Preguntas.....	202
VIII. Determinación de la Velocidad de Inyección.....	204
Laboratorio I – Entienda el Llenado y sus Limitaciones, Determine el Tiempo de Inyección Mínimo y la Presión Límite de Inyección.....	207
Procedimiento para Determinar el Tiempo de Inyección Mínimo y la Presión Límite de Inyección.....	208
Laboratorio II – Determinación del Tiempo de Inyección y la Velocidad de Inyección.	214
Laboratorio III – Gráfica de Reología y Determinación del Tiempo y Velocidad de Inyección Ideal.....	219
Laboratorio IV – Gráfica Aproximada.....	220
Laboratorio V – Predicción del Tiempo de Inyección.....	222
Preguntas.....	227
IX. Verificación del Balance del Llenado.....	229
Efecto del Tiempo de Inyección en el Balance del Llenado.....	231
Laboratorio - Balanceo del Llenado.....	234
Desbalance Termal.....	236
Desbalance en Moldes con Coladas Frías.....	237
Preguntas.....	239
X. Determinación de Parámetros en la Etapa de Empaque.....	241
Laboratorio I - Determinación de la Presión de Empaque.....	243
Verificación del % volumétrico inyectado basado en las posiciones del tornillo:	247
Laboratorio II - Determinación del Tiempo de Empaque.....	251
Empaque de Moldes con Colada Caliente y Válvulas en los Bebederos.....	253
Preguntas.....	255
XI. Determinación de Parámetros en la Etapa de Enfriamiento.....	259
Entienda su Producto.....	260
Tiempo de Enfriamiento.....	261
Optimización con la Temperatura del Molde.....	262
Procedimiento para medir la temperatura del fundido:	262
Otros Parámetros que Afectan el Enfriamiento.....	269
¿Cómo se Organiza un Experimento de Enfriamiento?.....	271
Preguntas.....	273
XII. Límites del Proceso.....	276
¿Qué causaría que se alcanzara el límite de presión máxima de inyección y cuáles podrían ser sus consecuencias?.....	277

¿Qué causaría que se alcanzara el límite bajo del colchón y cuáles podrían ser sus consecuencias?.....	277
¿Qué causaría que se alcanzara el Límite Alto del Colchón y cuáles podrían ser sus consecuencias?.....	278
¿Qué causaría que se alcanzara el tiempo límite de plastificación y cuáles podrían ser sus consecuencias?.....	278
¿Cuál es un límite superior e inferior adecuado para la contra presión?.....	278
Preguntas.....	281
Apéndices.....	283
I - Causas y Efectos.....	284
II - Datos Universales del Molde.....	291
III - Ecuaciones de <i>Moldeo UniversalTM</i>	292
IV - Procedimiento General para <i>Moldeo UniversalTM</i>	302
V - Términos en Inglés al Español.....	306
VI - Términos en Español al Inglés.....	308
VII - Costos Operacionales.....	310
Bibliografía.....	312
Contestaciones.....	313
Índice.....	318
Opiniones de Expertos.....	321

Figuras

<i>I-1. Gráfica de reología en máquina inyectora</i>	16
<i>I-2. Gráfica de reología completa y aproximada</i>	17
<i>I-3. Etapa de inyección</i>	20
<i>I-4. Los espacios que el plástico ocupa en un molde</i>	21
<i>I-5. La anilla ("check ring")</i>	22
<i>I-6. La posición de la anilla durante la plastificación</i>	23
<i>I-7. La etapa de plastificación</i>	25
<i>II-1. Posiciones y etapas de inyección</i>	28
<i>II-2. Pared con moldes fríos y tiempos de enfriamiento extendidos</i>	34
<i>II-2a. Pared con moldes calientes y tiempos de enfriamiento cortos</i>	34
<i>II-3. La contrapresión ("back pressure")</i>	35
<i>II-4. La descompresión</i>	36
<i>III-1. Gráfica de inyección ideal</i>	43
<i>III-2. Gráfica de zona de control de velocidad o flujo de inyección</i>	45
<i>III-3. Gráfica de zona de empaque o control de presión</i>	47
<i>III-4. Gráfica de zona de plastificación</i>	49
<i>III-5. Gráfica de presión limitada</i>	50
<i>III-6. Gráfica de transferencia prematura</i>	51
<i>III-7. Gráfica de proceso defectuoso con cojín igual a cero</i>	52
<i>III-8. Gráfica de velocidad programada no fue alcanzada</i>	52
<i>III-9. Diagrama de PVT (Presión, Volumen y Temperatura)</i>	53
<i>III-10. Diagrama de PVT con etapas de moldeo</i>	54
<i>IV-1. Ilustración representando organización de moléculas amorfas y semi-cristalinas</i>	58
<i>IV-2. Gráfica ilustrativa de rigidez contra temperatura en materiales amorfos</i>	59
<i>IV-3. Gráfica ilustrativa de rigidez contra temperatura en materiales semi-cristalinos</i>	60
<i>IV-4. Gráficas sobrepuestas de rigidez contra temperatura de materiales semi-cristalinos y amorfos</i>	61
<i>IV-5. Materiales amorfos y semi-cristalinos comunes</i>	61
<i>IV-6. Listado con características mecánicas de materiales amorfos y semi-cristalinos.</i>	63
<i>IV-7. Listado de características del proceso con materiales amorfos y semi-cristalinos</i>	64
<i>IV-8. El encogimiento de materiales amorfos</i>	64
<i>IV-9. El encogimiento de materiales semi-cristalinos</i>	65
<i>IV-10. Efecto del tiempo de endurecimiento de los bebederos en materiales amorfos y semi-cristalinos</i>	66
<i>IV-11. Efecto del empaque en el peso de las piezas en materiales amorfos y semi-cristalinos</i>	67
<i>IV-12. Efecto de la presión de inyección en el tiempo de inyección en materiales amorfos y semi-cristalinos</i>	68
<i>V-1. Mecánica del secado de termoplástico</i>	74
<i>V-2. Tolva de secado y secadora</i>	76
<i>V-3. Tolva secadora</i>	77
<i>V-4. Volumen/tiempo de residencia</i>	78
<i>V-5. Circuito de secado</i>	81
<i>V-6. Circuito de regeneración</i>	84
<i>V-7. Unidad portátil</i>	86

<i>V-8. Tolva sobre la extrusora</i>	87
<i>V-9. Unidad integrada</i>	88
<i>V-10. Secadora central</i>	88
<i>V-11. Tabla de materiales y sus parámetros de secado</i>	90
<i>V-12. Tabla de materiales y sus densidades granel</i>	92
<i>V-12a. Tabla de materiales y sus densidades granel (cont.)</i>	93
<i>V-13. Flujo de aire seco requerido por cada lb/h de consumo de material</i>	94
<i>V-14. Dosificador</i>	100
<i>V-15. Gráfica de ajuste vs. dosificación</i>	101
<i>V-16. Montura de dos dosificadores en un mismo sistema</i>	102
<i>V-17. Sistema gravimétrico</i>	103
<i>V-18. Válvula proporcional neumática</i>	104
<i>V-19. Centro de mezclado</i>	105
<i>V-20. Tabla de energía requerida por algunos materiales</i>	108
<i>V-21. Tabla termal para algunos materiales</i>	109
<i>V-22. Flujo de agua por los pasajes del molde y Delta T</i>	111
<i>V-23. Conexión de las mangueras de agua al molde en serie y en paralelo</i>	111
<i>V-24. Temperatura entre las cavidades</i>	112
<i>V-25. Tabla de constantes para ecuación de tiempos de enfriamiento</i>	117
<i>V-26. Temperatura y presión del agua entrando y saliendo</i>	118
<i>V-27. Diagrama de los componentes de enfriamiento directo</i>	119
<i>V-28. Diagrama de los componentes de enfriamiento y calentamiento directo</i>	120
<i>V-29. Tres máquinas compartiendo un chiller</i>	122
<i>V-30. Tres máquinas compartiendo un chiller; con una máquina detenida</i>	123
<i>VI-1. Tabla de factores de presión para algunos materiales</i>	127
<i>VI-2. Área proyectada de una esfera</i>	128
<i>VI-3. Área proyectada de un cubo</i>	128
<i>VI-4. Área proyectada de un vaso</i>	129
<i>VI-5. Rodillos de nilón y coladas con y sin partes</i>	130
<i>VI-6. Área proyectada de uno de los 12 rodillos y su colada</i>	131
<i>VI-7. Área de la colada</i>	131
<i>VI-8. Ejemplo de una pieza en forma de L</i>	133
<i>VI-9. Trayecto del flujo de un rodillo</i>	134
<i>VI-10. El grosor (G)</i>	135
<i>VI-11. Tabla de criterio de pared fina</i>	136
<i>VI-12. Interpolación lineal del factor de presión</i>	136
<i>VI-13. Actuadores accionados por la fuerza de cierre</i>	137
<i>VI-14. Medidas para calcular el área proyectada</i>	138
<i>VI-15. Fuerza lateral por actuador</i>	138
<i>VI-16. Fuerza resultante</i>	139
<i>VI-17. Molde de tres platos</i>	140
<i>VI-18. Molde doble ("stack")</i>	141
<i>VI-19. Vectores de fuerza del molde doble</i>	142
<i>VI-20. Espacios en platina con barras</i>	142
<i>VI-21. Espacios en platina sin barras</i>	143
<i>VI-22. Apertura mínima de la prensa</i>	144
<i>VI-23. Apertura máxima de la prensa</i>	144
<i>VI-24. Patrón de expulsores</i>	145

VI-25. Plastificación máxima	147
VI-26. La punta de la boquilla (“nozzle tip”) y el casquillo (“sprue bushing”)	150
VI-27. Diámetros y radios de la punta de la boquilla y del casquillo	151
VI-28. Defecto causado por concentración de esfuerzo en los filos de la boquilla	152
VI-29. Defecto causado por un palo atascado en la boquilla	152
VI-30. Otro defecto causado por un palo atascado en la boquilla	153
VI-31. El flujo de fundido termoplástico en un molde	154
VI-32. El efecto fuente	154
VI-33. Ejemplo de efecto fuente utilizando un pedazo de servilleta	155
VI-34. Posiciones del llenado	158
VI-35. Volumen de residencia	163
VI-36. Tabla de residencia T_r (ejemplo)	165
VI-37. Tabla de tiempo de residencia de acuerdo con el % de utilización	165
VI-38. Tabla de % de utilización de acuerdo con el tipo de industria	166
VI-39. Posición de transferencia	167
VI-40. Tablas con criterio para la posición de transferencia	168
VI-41. Posiciones del tornillo	169
VI-42. Las zonas de calor del barril	170
VI-42. Perfil de temperaturas	171
VI-43. Razón de intensificación	174
VII-1. Orientación de moléculas en un flujo de fundido	181
VII-2. Esfuerzo cortante	182
VII-3. La mitad del flujo de fundido	182
VII-4. Vectores de velocidad en un flujo de fundido	183
VII-5. Flujo de fundido Newtoniano y pseudoplástico	184
VII-6. Gráfica de reología en máquina por potencia	186
VII-7. Gráfica de tiempo de inyección contra potencia pico	186
VII-8. Zona en donde el cambio en tiempo de inyección es mínimo o la potencia dejó de contribuir	187
VII-9. Zona en donde el cambio en viscosidad relativa es mínimo	190
VII-10. Lecturas de presión de transferencia y tiempo de inyección	191
VII-11. Gráfica de comportamiento lineal entre flujo de inyección y potencia pico	192
VII-12. Gráfica de comportamiento lineal entre viscosidad relativa y tiempo de inyección	192
VII-13. Ejemplo de tiempos de inyección y presiones de transferencia	193
VII-14. Ejemplos de valores de reología	194
VII-15. Gráfica del efecto lineal entre flujo promedio y potencia pico de inyección	194
VII-16. Gráfica del efecto lineal entre viscosidad relativa y tiempo de inyección	195
VII-17. Tabla incluyendo 8 tiempos de inyección equidistantes	196
VII-18. Gráfica aproximada entre tiempo de inyección y potencia pico de inyección	196
VII-19. Gráfica aproximada entre viscosidad relativa y velocidad cambiante relativa	197
VII-20. Gráficas de reología sobrepuestas, completa y aproximada	197
VII-21. Gráfica de reología normalizada en %	198
VII-22. Tiempo de inyección para industrias de moldeo convencional	199
VII-23. Tiempo de inyección para industrias que moldean materiales sensitivos a la fricción	200
VII-24. Tiempo de inyección para industrias de alto volumen de inyección	200
VIII-1. Flujo de eventos de Moldeo Universal™	205

<i>VIII-2. Tablas para seleccionar la posición de transferencia de inyección a empaque</i>	209
<i>VIII-3. Determinación del tiempo mínimo y la presión máxima de inyección (ejemplo)</i>	211
<i>VIII-5. Encabezado de la tabla de reología</i>	216
<i>VIII-6. Tabla de reología aproximada por potencia</i>	217
<i>VIII-7. Tabla de reología completa por potencia</i>	217
<i>VIII-9. Ejemplo de tabla de reología aproximada por potencia</i>	220
<i>VIII-10. Gráfica con ecuación lineal entre potencia pico y flujo promedio de inyección</i>	221
<i>VIII-11. Tabla y gráfica de reología completa y aproximada por potencia</i>	222
<i>VIII-12. Tabla de reología por potencia aproximada</i>	223
<i>VIII-13. Gráfica de reología indicando tiempos de inyección por industria</i>	224
<i>IX-1. Molde de múltiples cavidades con llenado desbalanceado</i>	230
<i>IX-2. Gráfica del efecto de la velocidad de inyección en el llenado de piezas incompletas</i>	231
<i>IX-3. Llenado rápido y lento</i>	231
<i>IX-4. Ejemplo de secuencia del llenado de coladas</i>	232
<i>IX-5. Ejemplo de llenado lento</i>	233
<i>IX-6. Ejemplo de llenado rápido</i>	233
<i>IX-7. Ejemplo de llenado incompleto</i>	234
<i>IX-8. Piezas separadas de la colada</i>	235
<i>IX-9. Tabla con pesos de cavidades incompletas y sus correspondientes desviaciones del llenado</i>	236
<i>X-1. Gráfica del efecto de la presión de empaque en el peso de las partes</i>	242
<i>X-2. Tiempo de enfriamiento extendido</i>	243
<i>X-3. Tabla del efecto de la presión de empaque en el peso de las partes</i>	245
<i>X-4. Gráfica del efecto de la presión de empaque en el peso de las partes</i>	245
<i>X-5. Gráfica indicando el rango de presión de empaque</i>	246
<i>X-6. Determinación de la presión de empaque con la posición del colchón</i>	247
<i>X-7. Gráfica indicando presión de empaque excesiva</i>	249
<i>X-8. Corrección cuando el colchón es cero</i>	250
<i>X-9. Tiempo de enfriamiento extendido</i>	251
<i>X-10. Tabla de peso de partes y sus respectivos tiempos de empaque y de enfriamiento</i>	252
<i>X-11. Gráfica del efecto del tiempo de empaque en el peso de las partes</i>	253
<i>X-12. Características mecánicas de los materiales que deben considerar durante el empaque</i>	254
<i>XI-1. Tabla de experimento de optimización de la temperatura del molde</i>	263
<i>XI-2. Ejemplo de piezas de un molde de dos cavidades</i>	265
<i>XI-3. Tabla con resultados de temperatura del molde en medida crítica</i>	266
<i>XI-4. Gráfica del efecto de la temperatura de molde en medidas críticas</i>	267
<i>XI-5. Gráfica de ecuaciones lineales de temperaturas de molde en medida crítica de dos piezas</i>	268
<i>XI-6. Tabla con límites de temperaturas de molde en medida crítica de dos piezas</i>	268
<i>XI-7. Tabla de parámetros (temperatura y tiempo de enfriamiento), con sus combinaciones y sus repeticiones</i>	271

Prefacio

Moldear por inyección fue por muchos años un espacio ocupado por los experimentados maestros de la industria del plástico. Afortunadamente hoy existen varias técnicas que aceleran el aprendizaje y el dominio de moldeo por inyección.

Nosotros hemos experimentado con numerosos moldeadores de todo calibre. Entre todos nunca hemos encontrado dos que utilicen técnicas de moldeo idénticas. No solo las técnicas de moldeo son distintas, sino que tampoco es igual el lenguaje, el orden de ejecución, las definiciones, el uso de parámetros, la identificación de equipos, los procedimientos y la comunicación. Son esas las razones que motivan la escritura de este libro.

Moldeo UniversalTM (abreviado ***MUTM***) tiene como objetivo unificar estilos de moldeo, utilizar definiciones válidas del proceso, utilizar un lenguaje Universal y estandarizar procedimientos claros y representativos de todas las etapas del moldeo por inyección.

Este libro no se limita únicamente a los novatos de la industria; también se recomienda a los moldeadores experimentados que deseen estandarizar y aumentar la cantidad de moldeadores competentes en su sector. ***Moldeo UniversalTM: Método Sistemático de Optimización de Moldeo por Inyección (MUTM)*** es para cualquier persona que desee aprender sistemáticamente y de manera efectiva sobre el moldeo por inyección. ***MUTM*** guía al moldeador para determinar los parámetros ***Universales*** característicos del molde, independientemente de la máquina de inyección utilizada. Existe una preocupación que afecta a una minoría en la industria del plástico, la inteligencia artificial. Nosotros lo vemos como una herramienta que ayudará a resolver la falta de estandarización y las aproximaciones empíricas en la optimización de parámetros del proceso. La integración de la inteligencia artificial (IA) en ***MUTM*** considera los principios fundamentales de estandarización, aprendizaje rápido, procesos eficientes y beneficios significativos. Todos debemos esforzarnos por mejorar, aceptar y aprender nuevas metodologías y tecnologías que fortalezcan el crecimiento continuo en ***MUTM***.

Prólogo

¿Cuál es la definición de un proceso de moldeo de polímeros por inyección ‘óptimo’? En la realidad, no establecemos un proceso óptimo, sino que definimos una ventana operacional óptima alrededor de los valores de ciertos parámetros de moldeo que un laboratorio de optimización nos lleva a establecer y definir como ‘nominal’. Utilizando las herramientas que provee la internet podemos encontrar un sinnúmero de definiciones y/o métodos sobre lo que es un proceso óptimo, cómo establecerlo, e incluso cómo monitorearlo. Esas definiciones, en síntesis, establecen que un proceso de moldeo de polímeros óptimo es *“el resultado de una combinación particular de valores de parámetros de moldeo... dentro de una ventana operacional... capaz de consistentemente producir una pieza plástica que cumpla con todos los requisitos cosméticos, dimensionales y funcionales de diseño... en el menor tiempo de máquina posible”*. Esto, para cualquier combinación de material prima, diseño de molde y celda de moldeo (i.e. máquina de inyección, secadora, controles de temperatura, etc.). De igual manera, ese proceso óptimo *no puede serlo* si el mismo atenta contra la habilidad del molde o, incluso de la máquina de moldeo, para repetir el mismo ciclo de comportamiento de manera infinita.

El autor del libro ha dedicado gran parte de su vida profesional a identificar, de manera sistemática, dos cosas. Primero, en cómo alcanzar a establecer esa ventana operacional óptima en un proceso de moldeo; y segundo, en cómo lograr que esa ventana óptima de proceso para cualquier combinación de materia prima, molde y equipo de moldeo sea la misma independientemente de quién ejecute o dónde se lleve a cabo el laboratorio de optimización. Por eso lo de *“Universal”* en el título que lleva este ejemplar. Es la intención del autor, con las herramientas presentadas en este, su libro, lograr que el Ingeniero de Proceso sea capaz de identificar los requisitos mínimos con los que debe cumplir cada uno de los equipos y utilidades que componen la celda de moldeo. Una vez seleccionado correctamente el equipo, provee las herramientas para que los equipos seleccionados se conviertan en los cimientos sobre los cuales, de manera cabal, el ingeniero procesador pueda desarrollar el laboratorio y establecer los experimentos de diseño que darán forma a esa combinación de parámetros ‘nominal’ alrededor de la cual definirá los límites de esa ventana óptima de operación a validar. Esto... *en el menor tiempo de máquina posible*.

Felix Colón Ortiz

Injection Molding Process & Tooling Engineering Professional

I. Introducción

- ¿Qué es *Moldeo UniversalTM* (*MUTM*)?
- Fundamentos del Proceso de Inyección

En esta primera parte, el objetivo es familiarizar al lector con la terminología, haciendo hincapié en los parámetros significativos del proceso y estableciendo el lenguaje que se utilizará en el libro. Para evitar confusiones con términos regionales, el Apéndice III traduce algunos términos al inglés.

¿Qué es *Moldeo Universal*TM?

*Moldeo Universal*TM (*MU*TM) es una *disciplina de optimización de procesos de moldeo por inyección*. Esta se desarrolló con la colaboración de la industria plástica caribeña y la academia (UPR Mayagüez, Puerto Rico).

*MU*TM es una *disciplina* que enfatiza la maximización de recursos y se enfoca en la calidad del producto, utilizando metodologías de optimización de procesos comprobadas mediante técnicas de moldeo organizadas y científicamente respaldadas. Con ese trasfondo técnico-científico se aumenta las eficiencias, se disminuyen los costos de los productos y se reducen los ciclos de manufactura.

*MU*TM es un *lenguaje común* para los moldeadores que elimina la confusión de términos. Los equipos son rotulados con un lenguaje que representa sus capacidades. Es un lenguaje de parámetros *Universales* de proceso que simplifica la transferencia de procesos entre máquinas. Es un lenguaje que define el producto y su utilización.

*MU*TM es un *comité organizador* (o comité *Universal*). Es un grupo escogido que promueve la disciplina. Es un comité Universal representado por todos los departamentos de la fábrica Universal. Representa los departamentos de Producción, Control de Calidad, Mantenimiento de Equipos, Mantenimiento de Moldes, Ingeniería y Ventas.

*MU*TM es una *disciplina interminable* que nunca deja de crecer ni de mejorar. El comité *Universal* tiene la responsabilidad de evaluar y unánimemente adoptar procedimientos que mejoren los existentes.

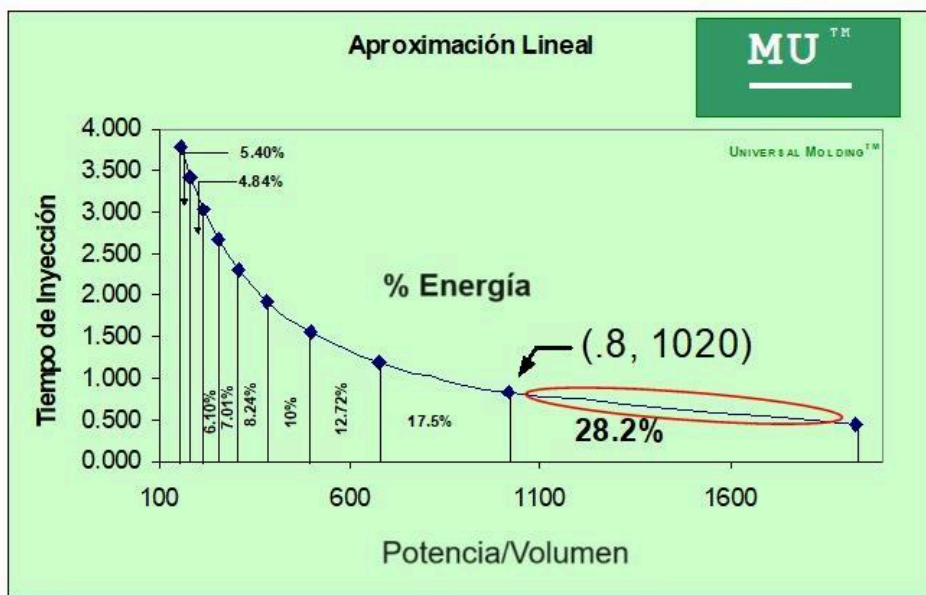
*MU*TM *se basa en procedimientos precisos y representativos del proceso*. En cada etapa, se sigue un procedimiento para determinar los parámetros, ya sea mediante ecuaciones lineales y en muchos casos con un componente no lineal que será generado por la inteligencia artificial (IA).

MUTM es maximizar la utilización de maquinaria. Es el determinar la maquinaria apropiada y de sus parámetros óptimos de proceso.

Algunas de las técnicas trabajadas son:

1- Reología en máquina inyectora. Esta técnica es efectiva y comprobada en la determinación del tiempo de inyección. Por medio de una gráfica se muestra el efecto del tiempo de inyección en la potencia por unidad de volumen.

En la gráfica el área bajo la curva representa el porcentaje de energía consumido por cada decremento en el tiempo de inyección.



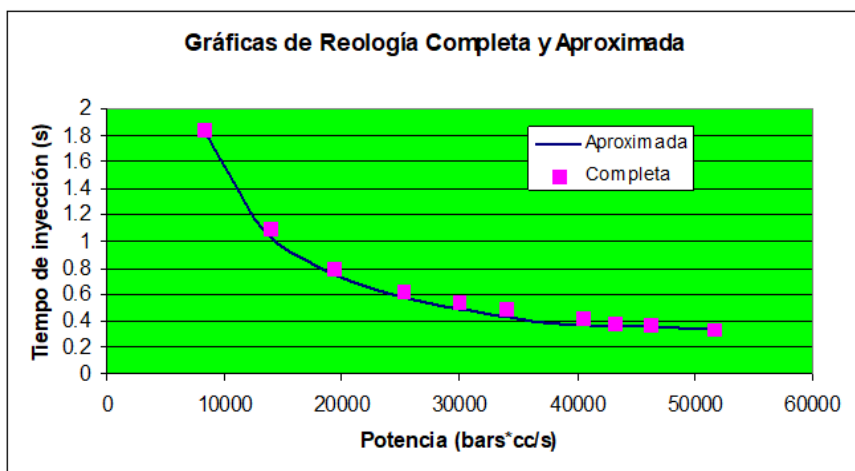
I-1. Gráfica de reología en máquina inyectora

Note que la potencia aumenta cuando se disminuye el tiempo de inyección. Esta gráfica revela que la potencia requerida a altos flujos de inyección es considerablemente alta o la energía consumida por la unidad inyección es más significativa a bajos tiempos de inyección. La idea es seleccionar un tiempo de inyección en la zona donde el tiempo deja de contribuir con aumento en potencia.

Más adelante se explicará cómo desarrollar y utilizar esta gráfica de reología en máquina de inyección.

2- Reología aproximada. El desarrollo de un laboratorio de reología en una máquina de inyección consume tiempo y recursos. Con la reología aproximada, una técnica matemática de predicción, el laboratorio se efectúa en menos de una 3ra parte del tiempo.

Las gráficas del tiempo de inyección contra potencia por unidad de volumen comparan los dos métodos; reología en máquina completa y el método aproximado.



I-2. Gráfica de reología completa y aproximada

Ahora ambos métodos, completo o aproximado, funcionan conceptualmente igual. La diferencia está en que el aproximado consume menos tiempo y recursos.

Una vez más, el desarrollo y uso de estas gráficas serán explicadas más adelante.

Fundamentos del Proceso de Inyección

Las etapas del proceso de inyección son las siguientes:

- inyección
- transferencia
- empaque
- endurecimiento de bebederos
- enfriamiento
- plastificación

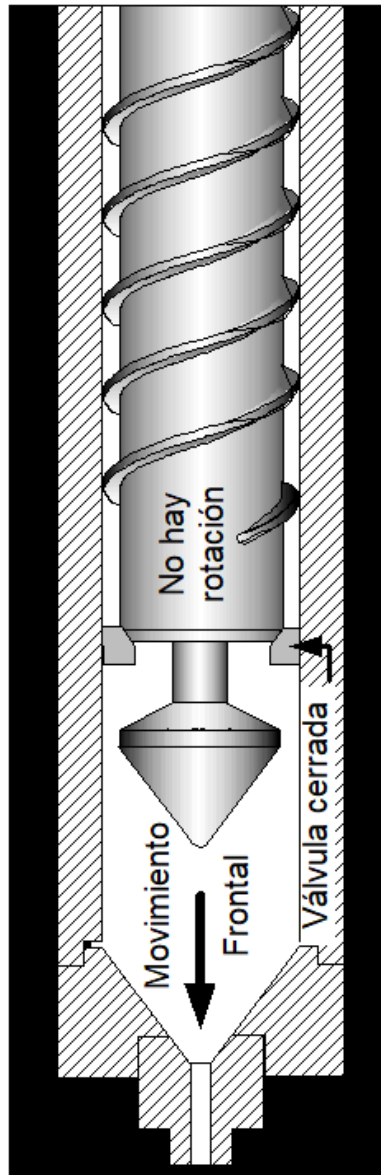
Cada etapa tiene una función y un resultado determinado. Entienda a cabalidad cada una de estas etapas ya que se hará referencia continua a estas definiciones.

Inyección - En esta etapa se llena el molde (cavidades y colada) cerca de un 95%, y el tornillo trabaja como un pistón que transfiere el fundido desde la unidad de inyección al molde. Aquí se programa una velocidad o un flujo de inyección que garantice las mejores propiedades del llenado. Estas propiedades podrían ser sin quemaduras, no líneas de flujo, no degradación, mínima concentración de esfuerzos, etc. Cuando el fundido caliente entra al molde se encuentra con las paredes frías y rápidamente se densifica hasta solidificarse. El llenado lento aumenta la densificación o la viscosidad y, consecuentemente, podría dificultar el llenado y hasta solidificar el fundido prematuramente antes de que se complete el llenado. En esta etapa el tiempo de inyección, al igual que la presión de inyección, son resultados y no parámetros de control. No los confunda con la *presión límite de inyección* ni con el *tiempo límite de inyección*, estos son límites que se programan para proteger el herramental y la máquina. Esta etapa se conoce como la etapa de control de velocidad de inyección.

Transferencia – Esta es quien termina la etapa de inyección. Una vez la unidad de inyección llena **cerca del 95%**, termina la etapa de llenado por inyección e inicia la próxima etapa, empaque. La unidad de inyección viene provista con un medidor de posición que mide el desplazamiento del tornillo, y es así como la unidad de inyección sabe que llenó cerca de un 95% del molde. Evite tratar de llenar el 100% del molde en la etapa de inyección. Veamos algunas razones:

- Podría crear rebaba en las piezas moldeadas. Quien frena al tornillo es el fundido en frente de la unidad de inyección y tratar de frenarlo exactamente al 100% sin abrir el molde sería difícil.
- A alta velocidad tratar de llenar el 100% podría crear el efecto rebote del tornillo. El plástico fundido es compresible y durante la inyección es comprimido. Este fluido comprimido querrá crecer, como un resorte comprimido, empujando la unidad de inyección hacia atrás ocasionando que parte del fundido que entró se regrese, efecto rechupe.
- Otra razón por el cual no podría es por el encogimiento del material. El material fundido ocupa más espacio que el material solidificado. Una vez que el fundido entra al molde se enfría, encogiéndose gradualmente y dejando espacios para más material.

Nota: Algunos moldes presentan una extrema dificultad de llenado; por ejemplo, las amarras de nilón ("*tie wraps*") que son largas y delgadas, o las aplicaciones de micromoldeo con espacios estrechos e incómodos para el llenado. En estos casos, es posible que se requiera un porcentaje de llenado superior al 95%.



Durante la etapa de inyección el tornillo se comporta como un pistón inyectando un fluido. El fundido se mantiene al frente del tornillo y la válvula impide que el fundido retorne al tornillo. El desplazamiento del tornillo comienza desde la posición de plastificación y continua hasta la posición donde transfiere a empaque.

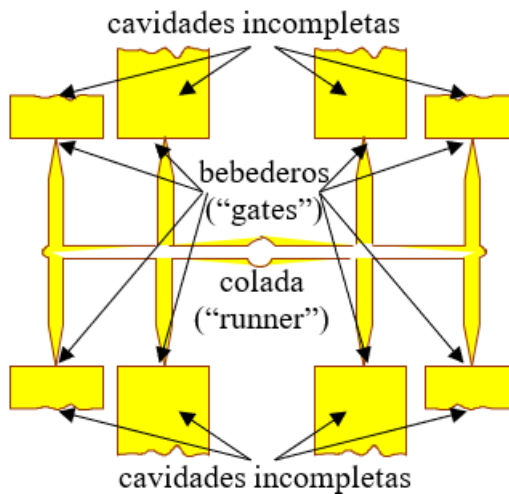
I-3. Etapa de inyección

Empaque ("hold") - En esta etapa el tornillo continúa actuando como un pistón, comprimiendo las cavidades hasta llenar el remanente que no pudo llenar en la etapa de inyección. Sin abrir el molde la unidad de inyección comprime el fundido, entrando más material al molde hasta

completar el llenado de las cavidades. Aquí el moldeador manipula la presión de compactación.

Durante el empaque se consigue el peso adecuado de las piezas moldeadas o lo que los moldeadores **Universales** llamamos “*dimensiones de masa*”. Las dimensiones de masa son aquellas que son únicamente función de la cantidad de material y no se deben confundir con las dimensiones que son efecto del encogimiento. El encogimiento se controla durante la etapa de enfriamiento. Como se indicó anteriormente, durante el empaque controlamos únicamente las dimensiones de masa, las dimensiones que son función de la cantidad de material.

Endurecimiento de bebederos - Durante el empaque las piezas son presurizadas hasta que el material en los bebederos se solidifica, creando un sello que retiene el fundido dentro de las cavidades. Veamos los espacios que el plástico ocupa en el molde.



I-4. Los espacios que el plástico ocupa en un molde

Un bebedero (“*gate*”) es el agujero por donde entra el fundido a las cavidades. El fundido entra por un bebedero (palo o “*sprue*”) y viaja por la colada (“*runner*”) hasta llegar a los bebederos en las cavidades. Lo normal es que los bebederos sean considerablemente más pequeños que la colada. El fundido es forzado a colarse por el estrecho espacio de los bebederos hasta llenar las cavidades. El plástico es sostenido dentro las

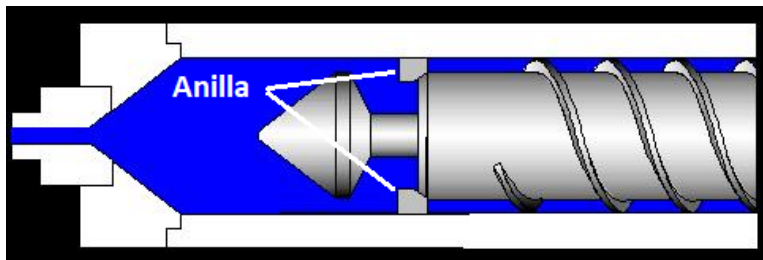
cavidades hasta que los bebederos se solidifiquen. Es importante entender:

- Si se remueve la presión de empaque prematuramente, el fundido retornará a la colada y posiblemente a la unidad de inyección.
- Si se empaqua por un tiempo mucho mayor de lo requerido, el moldeador estará “moldeando coladas”.

En algunos moldes con coladas calientes (“*hot runners*”), el fundido nunca se solidifica y se integra como parte del llenado de las próximas piezas. El objetivo de este tipo de molde es reducir el desperdicio de material de la colada. Sin embargo, incluso en este caso, los puntos de inyección hacia las cavidades deben solidificarse antes de liberar la presión de empaque.

En otros moldes, además de ser de colada caliente, se integran válvulas en los bebederos (“*gate valves*”). Estas válvulas permanecen abiertas durante el llenado y se cierran cuando se completa el empaque.

El tornillo se comporta como un pistón gracias a la anilla (“*check ring*”) que flota entre la punta del tornillo y el tornillo. Durante la inyección, la anilla se mueve contra el tornillo sellando y evitando que el fundido se regrese al tornillo.



I-5. La anilla (“check ring”)

Durante la inyección la presión en frente de la anilla es mayor que en el lado del tornillo obligando a la anilla a moverse contra el tornillo, creando el sello.

Existen tornillos que no tienen la anilla de sellado. El compuesto de PVC rígido es muy sensitivo a la fricción del fundido contra la anilla, y es común ver que no utilicen la anilla. Ahora, el tornillo viene provisto con un mecanismo de antirrotación para que no rote a consecuencia de la excesiva presión del fundido.

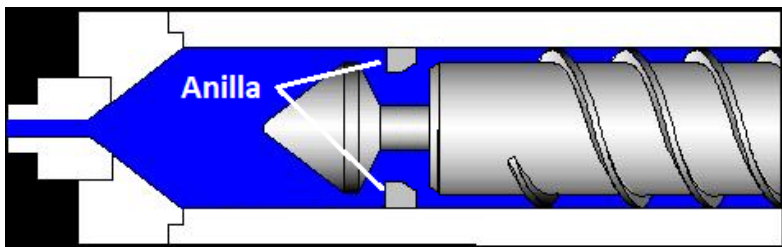
Enfriamiento - En esta etapa removemos calor de las partes, hasta obtener piezas que sean desmoldables con unas dimensiones térmicas aceptables. Dimensiones térmicas son dimensiones que son función del encogimiento y no de la cantidad de masa empacada. Las moléculas de un fundido termoplástico están en continuo movimiento; cuando se enfrían buscan conformidad y se acomodan, ocupando menos espacio. La idea es paralizar la actividad molecular y manipular el encogimiento a nuestra conveniencia.

Veamos:

- Moldes fríos y tiempos de enfriamiento extendidos dan paredes anchas.
- Moldes calientes y tiempos de enfriamiento cortos dan paredes delgadas.

Las dimensiones térmicas y también algunas propiedades mecánicas son una función de la rapidez con que se remueve el calor. Estas propiedades mecánicas podrían ser rigidez, translucencia, cristalinidad, etc. Más adelante explicaremos como estas dimensiones térmicas son función del tiempo de enfriamiento y la temperatura del molde.

Plastificación - En esta etapa, el tornillo carga material para el próximo tiro. El mayor objetivo es consistentemente producir un fundido homogéneo. Durante la plastificación la anilla se retira del tornillo, permitiendo el paso del fundido hacia el frente del tornillo en rotación.



I-6. La posición de la anilla durante la plastificación

El material fundido que se acumula en frente del tornillo es el que empuja el tornillo hacia atrás.

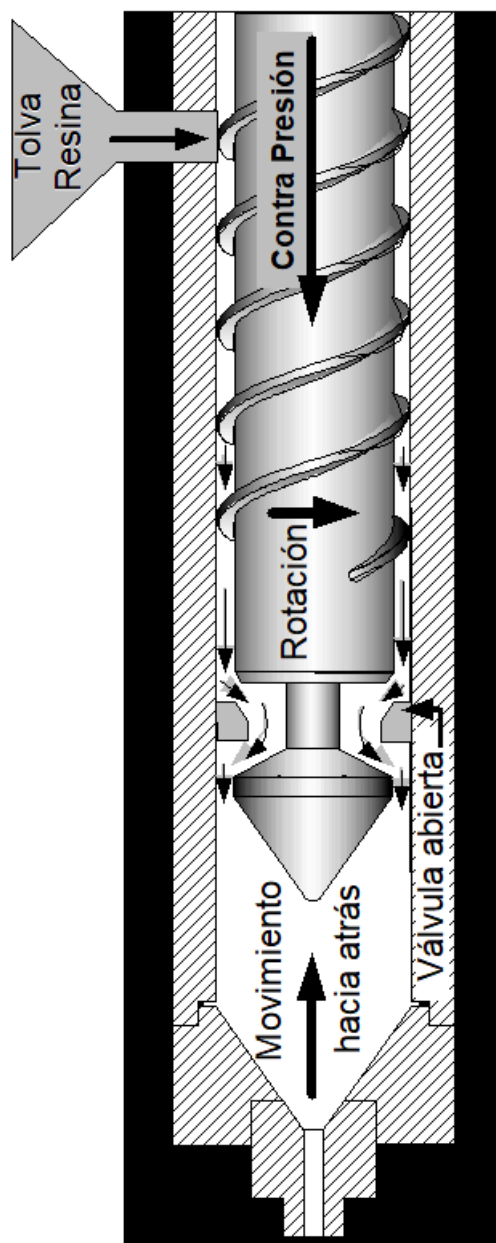
La plastificación sucede al mismo tiempo que la etapa de enfriamiento. Bajo condiciones normales la plastificación termina antes que el enfriamiento termine y, si el enfriamiento termina antes, el permiso para abrir el molde será denegado por el control. Bajo este evento, donde el permiso de abrir el molde sea denegado y además no existan alarmas que detengan el proceso, se extendería el tiempo de enfriamiento, alterando las dimensiones térmicas.

Imagínese qué sucedería si el molde abre durante la plastificación. El fundido se vaciaría por el molde. Durante la plastificación, el plástico está presurizado y quien retiene el fundido en la unidad de inyección es el molde lleno. Como regla general, la plastificación debe terminar cerca de un segundo antes que el enfriamiento. Permiso de abrir el molde durante la plastificación puede únicamente suceder cuando la unidad de inyección está provista con una válvula en la boquilla (*“nozzle”*).

Es importante saber que la unidad de inyección utiliza dos fuentes de calor para fundir el plástico, las bandas de calor y la fricción. Una regla general es que un 50% del calor proviene de las bandas de calor y un 50% del calor proviene de la fricción.

Más adelante se hablará de los parámetros que gobiernan la plastificación. Estos son velocidad de plastificación, posición de plastificación, contrapresión, descompresión y temperatura del fundido.

Movimientos del molde - Durante esta etapa se consigue el desmolde de partes. Una vez concluida la etapa enfriamiento, la secuencia es: el molde abre, si existieran los noyos (*“cores”*) salen librando las partes, las partes son expulsadas, los noyos entran, el molde inicia el cierre, la protección del molde se activa, y si la protección del molde no detecta inconvenientes, la prensa alcanza la fuerza de cierre y comienza un nuevo ciclo.



En la etapa de plastificación el tornillo gira, llevando el fundido hacia el frente del barril. La válvula se mueve, permitiendo el flujo del material y el mismo fundido que se acumula al frente empuja el tornillo hacia atrás. La contrapresión crea una carga que se opone al movimiento libre del tornillo. Esta contrapresión se refleja como esfuerzo o fricción en el material, lo que genera calor y contribuye al proceso de fundido.

I-7. La etapa de plastificación