

ANÁLISIS NUMÉRICO EN EL DISEÑO DE UN MOLDE PARA PROTESIS DE PIE EMPLEANDO HERRAMIENTAS DE DISEÑO (CAD) E INGENIERÍA (CAE) ASISTIDAS POR COMPUTADOR

María V. Candal^a, Jorge Romero, Carmen Müller-Karger^b y Orlando Pelliccioni^b

^aUniversidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica, Sección de Polímeros, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela. mcandal@usb.ve

^bUniversidad Simón Bolívar. Departamento de Mecánica, Grupo de Biomecánica, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela, cmuller@usb.ve, <http://www.biomecanica.usb.ve>

Palabras Clave: Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Engineering (CAE), simulación, molde de inyección, piezas plásticas sólidas y gruesas, prótesis de pie.

Resumen. Este estudio tuvo como objetivo principal diseñar un molde de inyección para fabricar un prototipo de prótesis para pie usando herramientas de diseño asistido por computador (CAD, del inglés *computer-aided design*), y verificar, mediante el método de elemento finito, que el molde propuesto podría generar piezas que pudieran cumplir con su función de forma adecuada. La propuesta de pie protésico, desarrollada por el Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar conforma un bloque sólido de aproximadamente 400 cm³ de Polióxido de Metileno (POM), algo poco común en piezas plásticas inyectadas y que exige requerimientos particulares fuera de las normas convencionales para el diseño correcto de un molde de inyección. Esta pieza si no es enfriada correctamente podría sufrir serios problemas de contracción volumétrica, alabeo y presencia de rechupes, que van en detrimento de las propiedades mecánicas de la pieza y la calidad de la geometría esperada.

Este trabajo, describe la metodología utilizada para modelar el comportamiento del molde diseñado durante el proceso de inyección del prototipo de prótesis de pie por aproximación numérica. El diseño del conjunto de piezas que constituyen el molde y su ensamblaje se realizaron con la herramienta CAD comercial Solidworks 2010, y su estudio se ejecutó bajo un modelo tridimensional de elementos tetraédricos empleando la herramienta comercial de ingeniería asistida por computador (CAE, del inglés *computer-aided engineering*) Autodesk Moldflow 10.

Se propuso un molde para inyectar una sola prótesis a la vez. El diseño final consta de un sistema de alimentación con entrada directa desde el bebedero y un sistema de refrigeración formado por canales pasantes y en forma de "U", con un diámetro entre 15 y 20 mm, y una distancia del centro de los canales hasta las paredes del molde de inyección de 0.8 veces el diámetro del canal. Adicionalmente se colocaron dos sistemas de refrigeración internos, dada la complejidad geométrica de la prótesis.

Se presentan resultados de tiempo de llenado de la cavidad del molde, tiempo de ciclo, contracción volumétrica, alabeo y rechupe de la pieza inyectada y se discuten en contraste con las recomendaciones que reporta la bibliografía técnica tradicional, las cuales son usualmente para la inyección de piezas de pared delgada. Finalmente, se propone una metodología para el diseño de moldes de inyección para piezas plásticas sólidas y gruesas.

1 INTRODUCCIÓN

Una de las funciones de los pies del cuerpo humano es proveer de estabilidad y balance cuando se está parado o en movimiento. La amputación de un pie reduce de forma significativa la habilidad para desarrollar actividades comunes como el caminar, lo que hace necesario el uso de una prótesis de pie para mejorar o restablecer la función de la persona con discapacidad (Rihs y Polizzi, 2001).

Actualmente, el alcance de una prótesis de pie se mide por la capacidad de representar la dinámica de un pie sano. Esta dinámica incluye características como: La Eversión-Inversión, la Flexión-Dorsiflexión, la Abducción– Aducción, el retorno de energía y la absorción de impacto. Es por esto que cada modelo de pie artificial existente en el mercado se adapta a la necesidad de una persona con discapacidad según sea su nivel de funcionalidad. Según la agencia de Administración del Financiamiento del Cuidado de la Salud (HCFA) en Estados Unidos de America, la asignación de la mejor prótesis a una persona con discapacidad se rige por su nivel de funcionalidad, que mide: El nivel de actividad, el potencial de rehabilitación, la profesión, el peso y el nivel de amputación. Son cinco niveles, del cero (0) al cuatro (4) y consideran desde la persona que no tiene la habilidad o el potencial para caminar de forma segura con o sin asistencia, hasta la persona que tiene la habilidad o potencial para caminar, atravesar barreras no comunes y enfrentar situaciones de alto impacto o esfuerzo, típico de personas activas, niños o adultos y atletas (ver <http://www.cms.hhs.gov>). El modelo de pie artificial que se presenta en este trabajo es un pie dinámico sin articulaciones que busca satisfacer las necesidades de personas con discapacidad dentro del Nivel 2 de Funcionalidad. El prototipo fue desarrollado dentro del Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar para ser fabricado como un bloque sólido de aproximadamente 400 cm³ de Polióxido de Metileno (POM).

La importancia de los materiales poliméricos sigue creciendo conforme avanza el tiempo. Existe una amplia variedad de materiales poliméricos altamente versátiles y son utilizados en aplicaciones que necesitan de cierta resistencia mecánica, buenas propiedades ópticas o de transparencia según el material. Se utilizan en aplicaciones como: envasado, empaquetado, recubrimientos, piezas médicas, entre otros, y en algunos casos, han logrado sustituir a otros materiales como madera, metales, fibras naturales, cerámicas, etc.

Uno de los procesos más utilizados para el procesamiento de los polímeros es el moldeo por inyección. El cuidado y minuciosidad a la hora de diseñar estos moldes es tan importante que hay casos en los cuales un molde de inyección puede llegar a costar tanto o más que la máquina a la que se acoplará el mismo. Estos moldes deben estar debidamente diseñados con un sistema de alimentación del material, así como un sistema eficiente de refrigeración y por último, un sistema de expulsión que facilite y apresure la salida de las piezas moldeadas sin dañarlas. La mayoría de las piezas fabricadas por este proceso suelen ser de pared delgada, por lo que su bibliografía es extensa referida a métodos para el diseño de moldes de inyección de piezas de este estilo (Kazmer, 2007; Rees, 2006). Por el contrario, en el caso de figuras de pared gruesa los reportes en la bibliografía son prácticamente nulos al respecto, así que cada quien adapta su propia metodología, según sea el caso. Los avances tecnológicos bajo simulación numérica, llámense programas de ingeniería y diseño asistido por computadora, han facilitado el estudio de las consideraciones necesarias a la hora de diseñar un molde, lo que ha permitido mejorar y perfeccionar el uso del moldeo por inyección.

2 ANTECEDENTES

El antecedente más importante para el diseño del molde estudiado es el trabajo realizado

por [Figueroa y Müller-Karger \(2007\)](#), que consistió en el diseño de una prótesis para amputaciones transtibiales, es decir, por debajo de la rodilla. Para obtener un prototipo ideal de prótesis se comenzó por estudiar una serie de consideraciones clínicas, y luego se generó, con la ayuda de una computadora, un modelo en 3D de la pieza. Con este modelo paramétrico, se procedió a realizar el análisis de esfuerzos, con lo cual se estimó su capacidad de almacenar y liberar energía con la finalidad de calificarlo o no como prótesis de comportamiento dinámico. Además, con los resultados obtenidos de los valores de esfuerzo máximo, peso, desplazamiento máximo y resistencia a la fatiga se realizaron las optimizaciones necesarias para obtener el modelo final.

Por otro lado, [Candal y Morales \(2006\)](#) en un estudio relacionado con el diseño de moldes para piezas de espesor mayor a 5 mm, encontraron que el empleo del factor de forma (relación calculada a partir del área superficial y del volumen de la pieza) es sumamente importante para obtener resultados similares a la realidad en el programa comercial de simulación del proceso de inyección C-MOLD. En el área de moldeo por inyección se han realizado otros trabajos como el de [Candal et al. \(2004\)](#), que consistió en el diseño de un molde de inyección para tapas de seguridad de uso farmacéutico. Las tapas están compuestas por una parte interna y una externa y se hicieron simulaciones del proceso de inyección probando distintos diseños de molde y sistemas de refrigeración para producir piezas en un tiempo de ciclo adecuado. Luego de las simulaciones y de la evolución de los diseños, finalmente se presentaron 2 propuestas para el molde, una con 4 cavidades con postizos intercambiables y otra con 8 cavidades para producir ambas piezas a la vez. El sistema de refrigeración escogido consistió en canales pasantes, circulares y “*baffles*”. Este trabajo sirvió como modelo por la metodología empleada para el diseño de un molde para la fabricación de una pieza empleada en el área médica, pero de pared delgada.

En el caso específico de las prótesis, [Picón et al. \(2009\)](#) desarrollaron un trabajo relacionado con el diseño de tres modelos de cajas intersomáticas para fusión lumbar. Una vez diseñadas las piezas, el proyecto continuó avanzando hasta lograr el diseño del molde para su producción con un material polimérico, pero por lo pronto, ya se obtuvieron los primeros prototipos nacionales en acero inoxidable por medio del proceso de mecanizado.

3 METODOLOGÍA

Las etapas que comprende todo proceso de simulación numérica, siguen una secuencia estricta de ajuste de parámetros para el preproceso. La herramienta comercial [Autodesk Moldflow 10 \(2010\)](#) organiza su árbol de trabajo bajo la siguiente metodología:

- Importar la geometría de la pieza que será inyectada.
- Crear la malla discretizando la geometría en elementos planos o volumétricos, dependiendo si el análisis se hace bajo un modelo bidimensional o tridimensional.
- Elegir el tipo de análisis que se efectuará y los resultados que se desean publicar.
- Selección del material inyectado y ajuste de sus propiedades mecánicas y reológicas (si es necesario).
- Selección de la ubicación de los puntos de inyección.
- Ajuste de las variables de proceso.
- Inicio de los cálculos.

Las siguientes subsecciones describen los detalles más relevantes de las diferentes etapas del proceso.

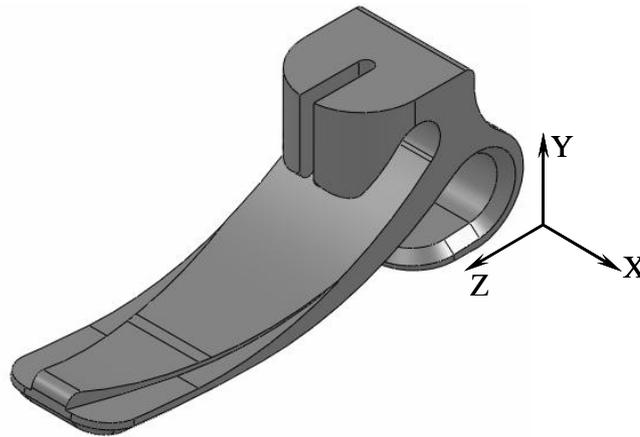


Figura 1: Isometría del modelo geométrico del pie protésico (Figueroa y Müller-Karger, 2007)

3.1 Reconstrucción de la geometría del pie protésico

La geometría de la prótesis fue propuesta por el Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar y presentada por Figueroa y Müller-Karger (2007). Representa un bloque sólido de aproximadamente 400 cm^3 de polímero y poco más de 500 g de masa con forma de pie. Según su nivel de funcionalidad, tendrá la habilidad o potencialidad para caminar, con capacidad para atravesar dificultades como curvas, escaleras o superficies irregulares. Es típico de personas que caminan dentro de su comunidad (ver <http://www.cms.hhs.gov>).

Su reconstrucción digital para el computador se realizó con la herramienta Solidworks 2010, respetando todos los detalles de dimensiones, grosor y curvaturas fieles al diseño original; la Figura 1 muestra una representación de la prótesis. El archivo obtenido fue exportado bajo un formato compatible a los archivos de lectura del programa de simulación de inyección de molde Autodesk Moldflow 10.

3.2 Ajuste de los parámetros de la simulación numérica

Previo a la ejecución del cálculo, deben ajustarse algunas variables del proceso que definen el tipo de máquina de inyección a utilizar, material del molde, propiedades mecánicas y reológicas del material de la pieza a inyectar, parámetros de control de inyección y enfriamiento del polímero (Rosato y Rosato, 2000). La Tabla 1 resume los valores que resultaron como la mejor opción para el diseño del molde al final de este estudio. En principio, fueron tomados valores sugeridos por la literatura especializada (ver subsección 4.1); sin embargo, y como verán en la siguiente sección, se repitieron los cálculos evaluando el efecto de cada parámetro del proceso hasta alcanzar los valores óptimos aquí presentados (ver sección 4).

El POM es un polímero altamente cristalino (60–77%) debido a la facilidad de empacamiento de sus cadenas. Sus propiedades principales son el índice de fluidez (MFI 190/2.16) de $2.3 \text{ g}/10\text{min}$, una densidad en sólido de $1.42 \text{ g}/\text{cm}^3$ y un módulo tensil de 3.1 GPa. El POM es usado como un material de ingeniería porque tiene una alta rigidez, combinada con buena resistencia al impacto, al *creep*, fatiga y abrasión, bajo coeficiente de fricción y absorción de humedad. Tiene excelente resistencia a solventes orgánicos pero por la estructura del acetal, es atacado por ácidos fuertes. La estructura del acetal es resistente al ataque con bases pero éstas atacan los grupos finales de tipo éster, lo que resulta en la depolimerización a altas temperaturas (Odián, 2004).

Variable del Proceso	Valor
Tiempo de ciclo	600 s
Temperatura de molde	85 C
Temperatura de fundido	205 C
Número de Reynolds	10.000
Porcentaje de solidificación de la pieza	75%
Velocidad de inyección	20 cm ³ /s
Presión sostenida	150 MPa
Tiempo de presión sostenida	120 s
Material del molde	Acero P20
Fuerza de cierre de la máquina de inyección	150 toneladas
Marca/Modelo de la máquina de inyección	Genérico
Tipo de análisis	<i>Cool+Fill+Pack+Warp</i> (Fases de llenado+enfriamiento+compactación +contracción)
Polímero inyectado	Polióxido de Metileno, POM (nombre comercial <i>Delrin</i> serie <i>100 N010</i> de <i>DuPont</i> ®),

Tabla 1: Valores finales utilizados como parámetros del proceso de inyección simulado del pie protésico.

Por razones de seguridad personal y para evitar daños en el equipo, normalmente no se usa el agua como fluido refrigerante a una temperatura igual o mayor a 90 C; por lo tanto, el refrigerante empleado fue aceite (Beaumont, 2007; Osswald et al, 2007).

3.3 Mallado del modelo geométrico y análisis de convergencia

Debido a la complejidad geométrica de la prótesis, fue seleccionado un modelo tridimensional para la simulación del proceso de inyección en el molde. El programa Autodesk Moldflow 10 (2010) utiliza para la discretización volumétrica elementos tetraédricos de cuatro nodos para generar la malla final. Estos elementos se caracterizan por utilizar las ecuaciones de Navier-Stokes completas, analizan presión, temperatura y los componentes de velocidad en las tres direcciones en cada nodo, consideran la conducción de calor en todas las direcciones y proveen opciones para usar efectos de gravedad e inercia (Shoemaker, 2006).

Para este trabajo se evaluaron diferentes densidades de malla incrementando de manera controlada el número de elementos del modelo en sus regiones críticas pero preservando una relación de aspecto de 50 para cada elemento. Las variables utilizadas para controlar la convergencia del modelo numérico fueron el tiempo de llenado, el tiempo de ciclo, la contracción volumétrica, el peso de la pieza final y los esfuerzos de corte en el polímero inyectado. La Figura 2 presenta los resultados del proceso de cálculo de las variables más sensibles. Fue seleccionado un modelo de 7705 nodos y 40431 elementos, que asegura una variación menor al 5% en cada curva de convergencia. Los resultados obtenidos en la curva de tiempo de ciclo se estabilizan a partir de 555 s aproximadamente; por lo que se decidió fijar como parámetro el valor de 600 s como un tope para el resto de las simulaciones estudiadas.

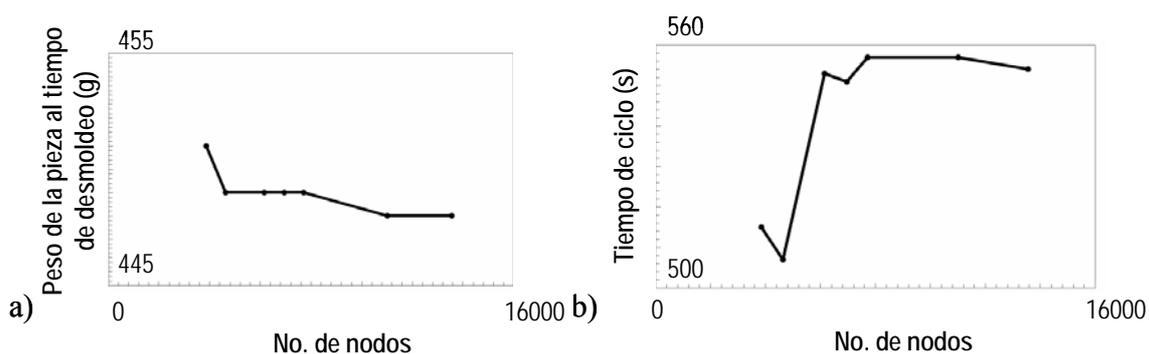


Figura 2: Estudio de convergencia del modelo numérico (a) Peso de la pieza, (b) Tiempo de ciclo

3.4 Diseño de los canales de refrigeración

Un diseño óptimo del sistema de refrigeración del molde de inyección asegura también la expulsión de una pieza sin problemas de estabilidad dimensional, contracción volumétrica y rechupes. La situación particular de fabricación de piezas muy gruesas complica notablemente el diseño y dimensionamiento de los canales, por lo que el uso de una herramienta de simulación numérica se hace prácticamente indispensable. La [Tabla 2](#) resume ocho propuestas posibles que difieren tanto en dimensiones, número de canales, sistemas de alimentación en frío o en caliente, cavidades y recorrido de los canales; todo buscando obtener los mejores resultados posibles.

Propuesta	Descripción
1	Sistema de alimentación: canales fríos (2 cavidades). Sistema de refrigeración: 8 canales de diámetros 8, 10, 11 y 15 mm y con un recorrido por distintas regiones de la pieza.
2	Sistema de alimentación: canales fríos (2 cavidades). Sistema de refrigeración: 10 canales de diámetros 8, 10, 11 y 15 mm, de los cuales 8 presentan un recorrido por distintas regiones de la pieza y 2 tienen forma de "U".
3	Sistema de alimentación: canales fríos (2 cavidades). Sistema de refrigeración: 12 canales de diámetros 8, 10, 11 y 15 mm, de los cuales 6 son pasantes, 4 en forma de "U" y 2 canales con un "baffle" en cada uno.
4	Sistema de alimentación: canales fríos (2 cavidades). Sistema de refrigeración: 10 canales de diámetros 15 y 20 mm, 4 de ellos son pasantes, 2 tienen forma de escalón, 2 tienen forma de "U" y 2 de ellos tienen un "baffle".
5	Sistema de alimentación: canales fríos (2 cavidades). Sistema de refrigeración: 8 canales de diámetros 15 y 20 mm, sólo 1 canal es pasante, 4 tienen forma de "U", de los cuales 1 tiene 1 "baffle" y 2 tienen forma de escalón.
6	Sistema de alimentación: canales fríos (2 cavidades). Sistema de refrigeración: 10 canales de 20 mm de diámetro. Cuatro de los canales son pasantes, 2 tienen forma de "U", 2 tienen forma de escalón y 2 tienen 1 "baffle" cada uno.
7	Sistema de alimentación: canales fríos (1 cavidad). Sistema de refrigeración: igual a la propuesta N° 6.
8	Sistema de alimentación: canales calientes (1 cavidad). Sistema de refrigeración: igual a la propuesta N° 6.

Tabla 2: Modelos propuestos de configuración del sistema de refrigeración del molde de inyección del pie.

4 RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a la evolución en el diseño del molde de inyección a través de modificaciones en la propuesta del sistema de refrigeración, corrigiendo de manera secuencial, las deficiencias de la propuesta previa. Como puntos de comparación se analizaron los cambios del porcentaje de volumen solidificado, contracción y alabeo del pie inyectado. Posteriormente, fueron estudiados los efectos al modificar los valores de las variables de proceso, buscando alcanzar los mejores resultados posibles sobre la pieza fabricada.

4.1 Selección del sistema de canales de refrigeración

Para una propuesta inicial de diseño se ubicó el punto de inyección del molde en una región donde el llenado de las cavidades fuera lo más uniforme posible. La ubicación de la entrada a las cavidades se mantuvo para todas las propuestas estudiadas porque se observó un buen comportamiento, mientras que los canales de refrigeración sí fueron objeto de múltiples modificaciones, en consecuencia del lento enfriamiento de la pieza de pared gruesa.

Usualmente en piezas de pared delgada el tiempo de ciclo se determina al solidificarse el 100% la pieza y el 75% de los canales de alimentación. Para piezas con un espesor tan grande, normalmente no se suele esperar que el 100% del volumen de la pieza se solidifique, porque el tiempo de ciclo se incrementa enormemente, lo cual no es rentable para la empresa productora. En el caso de este pie protésico, se espera lograr que al menos el 75% de la pieza haya solidificado para proceder a su desmoldeo, es decir, cuando esté totalmente sólida por fuera y algo fundida en el interior (Beaumont, 2008), sin incrementar notablemente su contracción postmoldeo; se sugiere que gran parte de la pieza presente para ese momento una temperatura menor a los 140 C.

Un fenómeno que debe analizarse cuidadosamente es el complejo comportamiento de la contracción de los materiales plásticos. Probablemente es el problema más dominante asociado con el diseño y manufactura satisfactorios del moldeo por inyección de partes plásticas. Durante el moldeo por inyección, las piezas pueden sufrir una reducción de hasta un 35% en el volumen específico a medida que son enfriados desde su estado fundido hasta un estado sólido. Una de las formas de contracción que experimentan los materiales plásticos es la volumétrica. Se espera que a medida que un material es calentado se expanda, y a medida que sea enfriado se contraiga (Beaumont, 2008). El valor máximo permitido de contracción volumétrica para piezas plásticas es de un 20%, y corresponde aproximadamente a la sobreestimación hecha por los programas de simulación numérica de moldeo por inyección (C-MOLD, 2000). Debe destacarse que para piezas de gran espesor la velocidad de enfriamiento es muy baja, lo que repercute en un aumento del grado de cristalización del material, y en un alto porcentaje de contracción. La reducción de este valor se logra haciendo variaciones en el tiempo de presión sostenida o en la presión sostenida.

Para la primera propuesta (ver Figura 3), los canales de refrigeración están separados de la pieza la distancia mínima normalmente recomendada en la bibliografía (Beaumont, 2008). Este diseño de molde posee dos cavidades para inyectar dos pies protésicos a la vez. Inicialmente se ajustó la temperatura de molde 90 C y la temperatura de fundido a 215 C, como sugiere el programa de simulación Autodesk Moldflow 10 (2010). La velocidad de inyección, presión sostenida y el tiempo de presión sostenida se ajustaron inicialmente a 20 cm³/s, 120 MPa y 120 s respectivamente, por experiencias previas de laboratorio. Al llevar a cabo la simulación de las tres fases del proceso de inyección se determinó que las dos cavidades poseen un tiempo de llenado de 40 segundos. Otras regiones de la pieza están a una

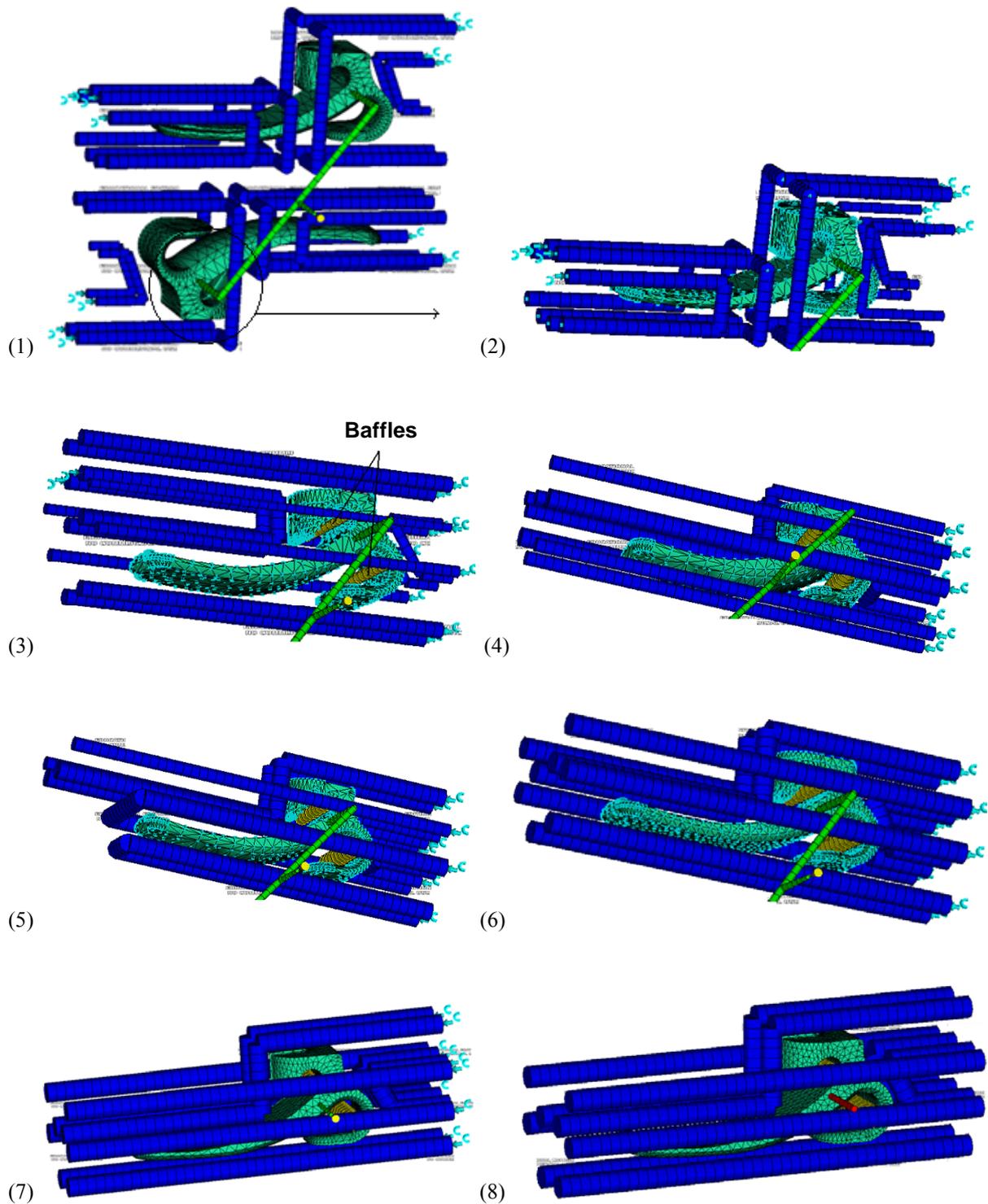


Figura 3: Propuestas para el diseño del sistema de refrigeración del molde en Autodesk Moldflow 10

temperatura entre 121–168 C y en la región más gruesa, la temperatura muestra un valor máximo de 202 C, lo que significa que en esa región el polímero aún está fundido. La totalidad de la pieza presentó una contracción volumétrica de 20%, lo cual es el valor máximo permitido para piezas plásticas. Con esta propuesta no se logra llegar al 75% del volumen solidificado antes de 900 s, por lo que se debe probar con otro sistema de refrigeración. También hay que destacar que la contracción volumétrica es demasiado alta, al igual que el

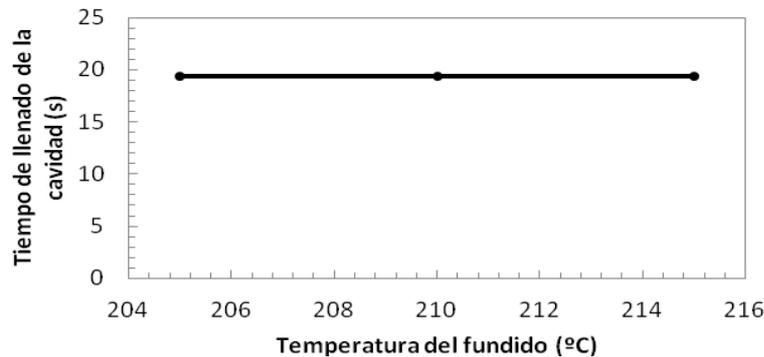


Figura 4: Variación del tiempo de llenado respecto a la temperatura de fundido

alabeo, principalmente en la dirección “Z”. La [Figura 1](#) señala la orientación de los ejes principales “XYZ”.

En la segunda propuesta, con la presencia de dos canales más que el diseño anterior se buscaba mejorar el enfriamiento en la región más gruesa de la pieza. No obstante, el porcentaje de volumen solidificado nuevamente fue de 71.8% a los 600 s, lo cual no constituye una mejora apreciable. Con relación a la contracción volumétrica y alabeo, no se presentaron cambios favorables.

Por esta razón el tercer modelo propuesto además de cambiar la forma de los canales de refrigeración, también incorporó dos “*baffles*”, para enfriar mejor las partes internas de la pieza. Con esta propuesta se obtuvo un 71.6% de volumen solidificado a los 600 s; posiblemente esta disminución se debió a que los canales con “*baffles*” presentaron un diámetro muy pequeño. Los valores de contracción volumétrica y el alabeo en todas las direcciones se mantuvieron sin cambios favorables.

La cuarta propuesta reduce el número de canales a 10 pero utiliza diámetros mayores y un nuevo trazado; los diámetros de los “*baffles*” también aumentaron. Se consideró una distancia más reducida desde el centro de los canales hasta las cavidades de 0.8 veces el diámetro de los canales (incluidos los “*baffles*”), que es lo mínimo recomendado por otras bibliografías ([Rees and Catoen, 2006](#)). Con los cambios realizados en el sistema de refrigeración de esta propuesta, se logró aumentar el volumen solidificado a los 600 s, alcanzándose un valor de 72.5%.

Las siguientes dos propuestas tampoco mostraron cambios considerables en los resultados, aún con diámetros de canales mayores. Es a partir de la séptima propuesta donde se observaron mejoras importantes en el alabeo de la pieza en las direcciones “Y” y “Z”, que disminuyeron de 4.3 a 2.3 mm y de 1.9 a 1.5 mm respectivamente. El resultado se debe a la simplificación del molde a una sola cavidad; la propuesta de refrigeración se mantiene igual al sexto modelo. Este cambio minimiza la cantidad de desperdicio presente por canales de alimentación, y se acepta porque la pieza al no ser de consumo masivo, no necesita inyectar dos piezas por vez. Por lo tanto, se modificó el sistema de alimentación de las propuestas anteriores por una entrada directa desde el bebedero pero manteniendo la ubicación del punto de inyección. En cuanto a la contracción volumétrica, el valor permaneció en 19% y el porcentaje de volumen solidificado permaneció sin cambios favorables.

Por último, la octava propuesta modifica únicamente el sistema de alimentación por uno de colada caliente. Por lo general, la bibliografía sugiere este tipo de sistemas porque asegura un mejor acabado de las piezas y además no produce desperdicio ([Beaumont, 2008](#)); como desventaja se incrementa el costo del molde. Con esta propuesta el volumen solidificado obtenido fue de 69.6% a los 600 s. Este resultado lo pone en desventaja con el sistema

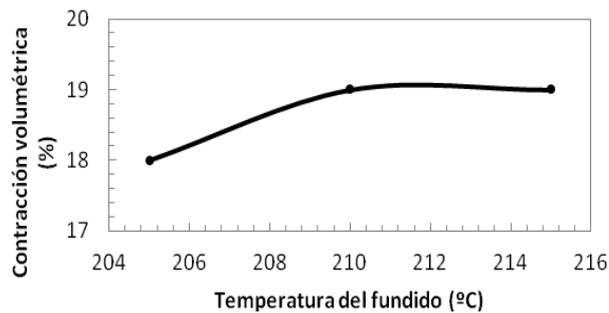


Figura 5: Variación de la contracción volumétrica respecto a la temperatura del fundido

anterior, además de que no se lograron mejoras en la contracción volumétrica, obteniéndose igualmente un valor de 19%. Este resultado se debe a que la zona en donde está la boquilla, es precisamente la más crítica en el enfriamiento de la pieza por ser la parte más gruesa de la misma; en consecuencia, el calor transferido a esa región afecta el enfriamiento de la pieza.

Tomando en cuenta los resultados anteriores, se decidió desarrollar la propuesta de diseño No. 7 por ser la que presenta un mejor enfriamiento de la pieza. Se buscará optimizar los resultados a través del ajuste de las variables de proceso.

4.2 Efecto de la variación de temperatura de fundido

Su efecto es importante, porque modifica el comportamiento del flujo del material al producirse cambios en su densidad y viscosidad. Se realizaron simulaciones con temperaturas en un rango de 205 a 215 C buscando obtener cambios en cada una de las fases del proceso de inyección.

El primer resultado presentado es el tiempo de llenado. Como se observa en la [Figura 4](#), no se presenta ninguna variación del tiempo de llenado (19 s) con el cambio de la temperatura de fundido. Se pensaba que este tiempo disminuiría conforme aumentaba la temperatura de fundido, ya que con una mayor temperatura, el polímero presenta una menor viscosidad y por lo tanto, una mayor fluidez. Sin embargo, este rango de temperatura de fundido no fue suficiente para mostrar cambios o la velocidad de inyección fue muy alta como para que la temperatura de fundido produjese algún cambio.

Por el contrario, en la fase de enfriamiento se obtuvieron cambios en la variación del tiempo de ciclo con respecto a la temperatura de fundido: Con una temperatura de 205 C se logró llegar al 75% del volumen solidificado deseado para poder desmoldear la pieza, a los 600 s, mientras que para temperaturas de fundido más altas el tiempo de ciclo es mayor a los 900 s. Con respecto al sistema de refrigeración, la temperatura del molde se mantuvo constante con una máxima temperatura de 111 C y la temperatura de los canales de refrigeración se mantuvo en 90 C.

Para la fase de compactación, la [Figura 5](#) muestra el efecto de la temperatura de fundido sobre la contracción volumétrica. Se observa un ligero aumento en la contracción desde un 18% hasta un 19%. Con una mayor temperatura de fundido las cadenas poliméricas del material tienen más oportunidad de relajar tensiones internas, a la vez que se van empaquetando. En el caso del POM, un material semicristalino, al facilitarse el ordenamiento molecular con el aumento de la temperatura, se produce un mayor porcentaje de cristalización, lo que resulta en una reducción del volumen libre entre las cadenas poliméricas y en consecuencia una mayor contracción volumétrica de la pieza ([Malloy, 1994](#); [Young, 2000](#)).

Con ayuda de los resultados presentados, se considera que la temperatura de fundido

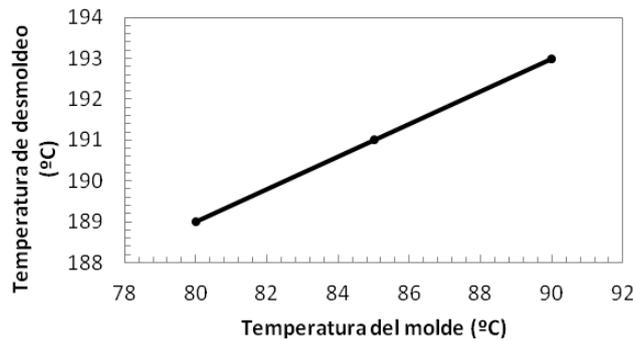


Figura 6: Variación de la temperatura de desmoldeo respecto a la temperatura del molde

óptima para el proceso de inyección de esta pieza es de 205 C, porque genera el menor consumo energético.

4.3 Efecto de la variación de la temperatura del molde

Una vez escogida la temperatura del fundido óptima para el proceso, se estudió la temperatura del molde dentro de un rango de variación de 80 a 90 C. En la fase de llenado no se observaron variaciones, mientras que para las demás fases se obtuvieron cambios importantes.

Para la fase de enfriamiento el resultado más importante fue la temperatura de desmoldeo. En la [Figura 6](#) se observa que un aumento en la temperatura del molde también incrementa la temperatura de desmoldeo de la pieza a un tiempo de 600 s. Siendo la pieza de un gran espesor, lógicamente a mayor temperatura del molde, mayor será el tiempo requerido para enfriar la pieza y mayor será la temperatura del núcleo fundido a un tiempo fijo.

Por otro lado, el resultado del porcentaje de volumen solidificado a los 600 s, muestra un comportamiento contrario, es decir, al aumentar la temperatura del molde disminuye el porcentaje de volumen solidificado a un mismo tiempo como se muestra en la [Figura 7](#). El resto de los resultados permaneció constante.

En definitiva, para aumentar la rapidez de enfriamiento se escogió una temperatura del molde de 85 C, a pesar de que los mejores resultados se obtuvieron a 80 C; sin embargo, no es recomendable usar temperaturas del molde muy bajas ya que pueden producir una mala calidad en el acabado de la pieza ([Rosato y Rosato, 2000](#)).

4.4 Efecto de la variación de la velocidad de inyección

Como se esperaba, la [Figura 8](#) muestra que al aumentar la velocidad de inyección se logra un llenado más rápido de la cavidad.

Existe una relación entre la presión de llenado (y por lo tanto la velocidad de inyección), la velocidad de corte y la viscosidad del polímero fundido. La viscosidad inicial del polímero a la entrada de la cavidad está determinada por la velocidad de corte y la temperatura de fundido proveniente de la máquina de inyección. Una alta temperatura de fundido y una alta velocidad de inyección resultan en una baja viscosidad del polímero fundido. Esta combinación de alta temperatura y velocidad de flujo pueden resultar en una presión de llenado más baja, mientras que una presión de llenado muy alta puede provocar que la velocidad de corte aumente en exceso, lo cual trae como consecuencia la degradación del polímero. Algunos materiales como el PVC rígido, poliuretano y los acetales, como es el caso del polímero usado para el pie protésico, son mucho más sensibles a las velocidades de corte que otros. La degradación de un polímero causada por altas velocidades de corte es el

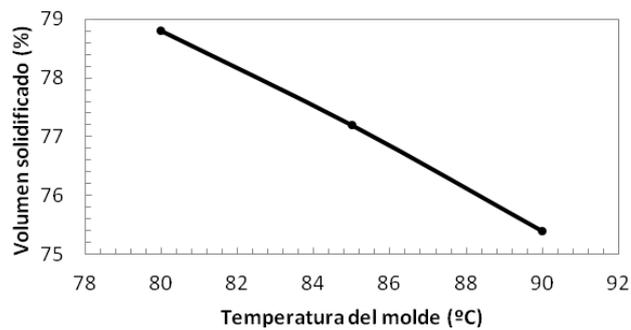


Figura 7: Variación del volumen solidificado respecto a la temperatura del molde

resultado de que las moléculas son físicamente distendidas o estiradas debido a la variación de velocidad a través del canal de flujo. Para evitar defectos de llenado por una velocidad muy alta se fijó una velocidad de inyección óptima de $20 \text{ cm}^3/\text{s}$.

4.5 Efecto de la variación del número de Reynolds

Se hicieron pruebas con números de Reynolds de 2000, 10000 y 15000 para identificar cuál era el más adecuado para el flujo del refrigerante. Para los números de Reynolds de 10000 y 15000, todos los resultados de las tres fases del proceso de inyección permanecieron sin variaciones, indicando que un aumento de más de 10000 Reynolds, que es lo recomendado usualmente (Rosato y Rosato, 2000), no aporta mejoras en los resultados. En cuanto a la prueba realizada con un número de Reynolds de 2000, el porcentaje de volumen solidificado de la pieza a los 600 segundos, disminuyó de 77.2 a 74%, lo que indica que es un número de Reynolds muy bajo y no se alcanza un flujo turbulento suficiente para un enfriamiento óptimo.

4.6 Efecto de la variación del tiempo de presión sostenida

Los tiempos de presión sostenida que se usaron fueron de 30, 120 y 180 s, sin embargo, todos los resultados de las 3 fases del proceso de inyección presentaron exactamente los mismos valores, indicando que esta variable del proceso no afecta los resultados, quizás por la combinación de las otras variables de proceso empleadas. Se escogió un valor de tiempo de presión sostenida de 120 s.

4.7 Efecto de la variación de la presión sostenida

Los valores de presión sostenida utilizados se tomaron entre 80 y 150 MPa y no se obtuvieron variaciones en la mayoría de los resultados de las tres fases del proceso de inyección. Los resultados que sí mostraron variaciones fueron los desplazamientos en las direcciones ortogonales de la pieza, y los porcentajes de contracción volumétrica y volumen solidificado.

Como era de esperarse, al aumentar la presión sostenida el porcentaje de volumen solidificado disminuyó para un tiempo dado (600 s). Esto se debe a que una mayor presión introduce más material fundido a la cavidad, lo que se hace principalmente para reducir la contracción volumétrica (Rosato y Rosato, 2000). Como no hay una variación muy marcada entre los resultados de volumen solidificado usando 120 y 150 MPa de presión sostenida, se escogió este último para tratar de reducir lo más posible la contracción volumétrica.

Los resultados de los desplazamientos en las direcciones ortogonales se muestran en la Tabla 3. Como se observa, al aumentar la presión sostenida los desplazamientos en las

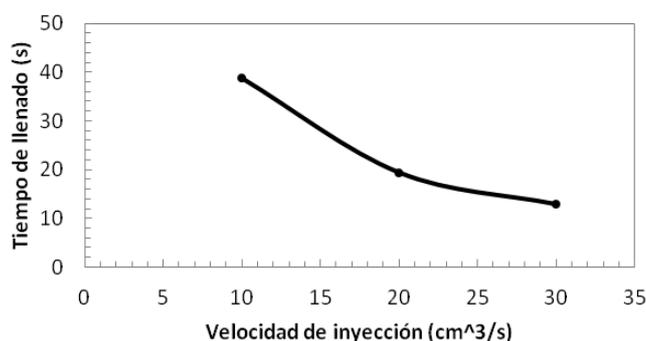


Figura 8: Variación del tiempo de llenado respecto a la velocidad de inyección

direcciones “Y” y “Z” disminuyen. Los resultados para 120 y 150 MPa de presión sostenida presentan una variación despreciable en la dirección “Y”, mientras que en las direcciones “X” y “Z” permanecen constantes.

Presión sostenida (MPa)	Desplazamiento en X (mm)	Desplazamiento en Y (mm)	Desplazamiento en Z (mm)
80	0.8	1.3	2.1
100	0.8	1.1	2.0
120	0.8	0.9	1.8
150	0.8	1.0	1.8

Tabla 3: Desplazamientos en las direcciones XYZ por efecto de la variación de la presión sostenida.

Estos valores de alabeo son referenciales, ya que seguramente la curva PvT que contiene Autodesk Moldflow 10 para el POM, fue realizada a condiciones diferentes a las utilizadas en este trabajo, por lo tanto, se necesitaría construir una curva PvT con dichas condiciones para obtener los valores reales de alabeo en cada una de las direcciones.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología para el diseño de moldes de inyección para piezas plásticas sólidas y gruesas apoyándose en la simulación numérica del proceso de inyección. Un estudio bajo el método del elemento finito permitió evaluar el diseño de un molde de inyección para una prótesis de pie.

Se debe considerar que una pieza de pared gruesa podría sufrir serios problemas de contracción volumétrica final, alabeo y presencia de rechupes si no se refrigera correctamente. Usualmente, se recomienda para piezas plásticas fabricadas en materiales semicristalinos un máximo de 20% de contracción volumétrica. Sin embargo, una pieza como el caso en estudio con un grosor mínimo de 3 cm necesita muchísimo tiempo para ser enfriada, lo que incrementa como consecuencia el tiempo de ciclo. En estos casos se debe considerar desmoldear la pieza completamente sólida en el exterior y algo fundida internamente, reduciendo así el tiempo de ciclo.

Los resultados del presente estudio también confirman que no se pueden aplicar las ecuaciones para el diseño de canales de alimentación y bebedero de piezas de pared delgada presentadas en la bibliografía a piezas de pared gruesa. Se optó en cambio, por evaluar distintos valores de diámetro bajo el modelo de simulación numérica hasta ajustarse a un valor óptimo de canal de alimentación. El dimensionamiento de la entrada-bebedero también se ajustó bajo el mismo procedimiento, dada la escasa bibliografía existente. Por el tamaño de

la pieza, se decidió diseñar un molde de una sola cavidad con una entrada directa desde el bebedero y se utilizó un sistema de canales fríos.

Nuevamente, para el dimensionamiento de los canales de refrigeración, la bibliografía recomienda diámetros entre 8 y 12 mm para piezas de pared delgada, pero se decidió probar con diámetros mayores para asegurar el enfriamiento de la pieza, llegando hasta valores de 20 mm. Se ajustó la distancia mínima entre los canales de refrigeración y la pieza al mínimo valor que sugiere la bibliografía (0.8 veces el diámetro). Por el grosor de la pieza fue necesario asegurar un enfriamiento interno y externo similar para minimizar el alabeo posible luego del desmoldeo.

6 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo, desarrollado en el Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar fue parcialmente financiado por el Decanato de Investigación y Desarrollo de la Universidad Simón Bolívar (Venezuela). El desarrollo de la investigación contó con la especial colaboración del C.P.O. Fernando Carvalho y la empresa Biotecpro C.A., quienes participaron activamente en la evolución del diseño del prototipo presentado.

REFERENCIAS

- Beaumont, J., *Runner and Gating Design Handbook: Tools for Successful Injection Molding*, 2nd edition, Hanser Verlag, USA, 2008.
- Candal, M., and Morales, R., Effect of the Model properties over the injected parts dimensions, *SPE's ANTEC 2006*, USA, 1230–1234, 2006
- Candal, M., Grimaud, R., and Morales, R., Injection Family Molds Productivity Using CAD/CAE Tolls, *SPE's ANTEC 2004*, USA, 818–822, 2004.
- Advanced CAE Technology, Inc., *C-MOLD Help*, Molding Intelligence for Plastics Professionals, USA, 2000.
- Figueroa, R., and Müller-Karger, C., Análisis de esfuerzo por el Método de Elementos Finitos en el Proceso de Diseño de Pie Artificial, *CLAIB 2007, IFMBE Proceedings 18*, 732–735, 2007.
- Kazmer, D., *Injection Mold Design Engineering*. Hanser Verlag, USA, 2007.
- Malloy, R., *Plastic Part Design for Injection Molding*, Hanser Verlag, USA, 1994.
- Autodesk Inc., *Moldflow Help*, Autodesk Moldflow Insight, 2010.
- Odian, G., *Principles of Polimerization*, 4^a edición, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2004.
- Osswald, T., Turng, L. and Gramann, P., *Injection Molding Handbook*, 2nd edition, Hanser Verlag, Alemania, 2007.
- Picon, V., Matos, M., Müller-Karger, C., Candal, M., and Nicola, H., Design and evaluation of an interbody fusion cage, *SPE's ANTEC 2009*, USA, 1882–1887, 2009.
- Rees, H., and Catoen, B., *Selecting Injection Molds: Weighing Cost versus Productivity*, Hanser Verlag, USA, 2006.
- Rihs, D., and Polizzi, I., *Prosthetic Foot Design*, Monash Rehabilitation Technology Research Unit, Monash, Australia, 2001.
- Rosato, D. and Rosato, M., *Injection Molding Handbook*, 3rd edition, Springer, USA, 2000.
- Shoemaker, J., *Moldflow Design Guide*, Hanser, USA, 2006.
- Young, R., *Introduction to Polymers*, Chapman & Hall, 2da edición, USA, 2000.