

BIOINGENIERÍA

Aplicación de las técnicas *Computer Aided Design*, *Fused Deposition Modeling* y *Precision Casting* para fabricación de exoprótesis

ALEJANDRO ECHAVARRÍA*, ENRIQUE MONSALVE, JORGE RAMÍREZ, JAIME GIRALDO, ZORAIDA OSORIO

Grupo de Investigación en Rehabilitación Física (Giref), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia.

* aechave@udea.edu.co

Artículo recibido: 06/10/2008
Evaluación: 07/10/2008
Aprobado: 24/10/2008

Resumen

En el presente artículo se ilustra la fabricación de una pieza para prótesis monocéntrica de rodilla empleando diseño asistido por computador (CAD), la técnica del prototipado rápido y la fundición de precisión a la cera perdida. Previo diseño de las piezas articulares de la prótesis usando *software* CAD, utilizamos el método de los elementos finitos (FEM) para simular los esfuerzos generados en la pieza en condiciones de marcha normal, garantizando que con las dimensiones dadas estos esfuerzos están dentro del rango de seguridad. Con los diseños en CAD y diseñando los alimentadores de la pieza, se simuló los procesos de solidificación y vaciado de proceso de fundición mediante los programas *Solidcast* y *Solidflow*. Luego se construyó un modelo en *Acrylonitril-Butadien-Stiren* (ABS) utilizando un equipo de prototipado rápido *Fused Deposition Modeling* (FDM). La pieza final fundida se vació en aleación Al-7Si por la técnica *Precision Casting* del modelo perdido. Se encontró que la insuflación de nitrógeno es el mejor método de desgasificación del aluminio, con temperatura del molde entre 100 y 150 °C y del metal fundido de 650 °C, dando como resultado una pieza libre de poros. Después de realizar pruebas mecánicas del material obtenido, se hizo una nueva fundición adicionando magnesio y sometiéndola a un tratamiento térmico, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del material.

Palabras claves: prototipado rápido, diseño asistido por computador (CAD), elementos finitos, fundición de precisión, prótesis monocéntrica de rodilla, aleación A356, aleación A357, tratamiento térmico, biomecánica.

Abstract

The article illustrates the manufacture process for monocentric knee prosthesis using *Computer Aided Design (CAD)*, *Fused Deposition Modeling* and *Precision Casting*. To assess the viability of a new knee prosthesis, first of all, design the pieces using CAD softwares, and then using the finite elements method (FEM), evaluate the stress levels in the piece in normal running conditions, this method shows if the stress levels are in the range of security. With the CAD designs, a model with ABS was built, using fast prototyping equipment; this model will be use in the casting was lost process, it's important to oversize the pieces to compensate contraction effects, and give values of over-machining thickness. The final piece was cast in an Al-7Si alloy (ASTM A356), the goal of this investigation is search and standardize a secure method allows make high quality prosthesis.

Keywords: rapid prototyping, computer aided design, finite elements, precision casting, knee monocentric prostheses, A356 alloy, A357 alloy, thermal treatment, biomechanics.

INTRODUCCIÓN

En Colombia ocurre cada año un número importante de accidentes de tránsito y hechos de violencia, en especial los asociados a eventos con minas antipersonales (MAP), que lamentablemente generan una población representativa de niños, jóvenes y adultos en edad laboral activa amputados en alguna de sus extremidades inferiores. Estos dos fenómenos generan una población que, sumada a la de amputados por enfermedades, requiere dispositivos para su movilización, entre los cuales el más representativo es la prótesis externa o exoprótesis.

Se conoce como prótesis a los dispositivos mecánicos, electrónicos o electromecánicos que suplen la función de un miembro ausente, o parte de él. Pueden clasificarse en dos grandes tipos: endoprótesis y exoprótesis. Las primeras se implantan mediante cirugía, se anclan al hueso y sirven para sustituir una articulación que ha sido deteriorada por artrosis, artritis, traumatismo u otras enfermedades. Las exoprótesis, por otro lado, sirven para sustituir un miembro amputado.

En la actualidad, la industria y la investigación biomédica han progresado considerablemente, gracias al aumento de desarrollos tecnológicos, orientados a optimizar el proceso de diseño y manufactura de piezas utilizadas en medicina. Se desea presentar una metodología que se está usando ampliamente en la producción de prótesis, como el modelado por medio del método de prototipado rápido.

Esta es una técnica muy poderosa, ya que nos brinda una gran variedad de oportunidades a la hora de aprovechar metodologías de diseño como la ingeniería inversa y generación de piezas, entre otras, para crear nuevos productos que se acomoden a las necesidades de la sociedad actual.

Básicamente, las técnicas de prototipado rápido tienen como objetivo conseguir de manera rápida y exacta una réplica tridimensional de los diseños que se han generado mediante aplicaciones CAD en 3D.

Estos modelos físicos pueden ser únicamente estéticos y útiles en consecuencia para estudio de formas y estudio de la aceptación por el mercado potencial al que van dirigidos, o pueden cumplir con buena parte de los requerimientos mecánicos que tendría la pieza definitiva, ofreciendo en este caso la posibilidad de realizar pruebas funcionales e incluso de homologación antes de que existan los moldes preliminares.

La mayor o menor similitud que pudiera existir entre el modelo definitivo y el obtenido mediante las técnicas de prototipado rápido dependerá básicamente del sistema utilizado para su generación y de limitaciones dimensionales, de complejidad y de posprocesos aplicados.

Las ventajas que ofrece la utilización sistemática de esta tecnología dentro del proceso global del lanzamiento de un nuevo producto abarcan a casi todos los departamentos que, directa o indirectamente, están involucrados en él.

Adicional al proceso de diseño con herramientas CAD y modelado por medio de prototipado rápido, se usó el método de fundición de precisión al molde perdido, mediante el cual se optimizó el material que se va a emplear en la manufactura final del conjunto articular, implementando técnicas de fundición como adición de elementos que mejoren el tamaño y límite de grano, y sometimiento a tratamientos térmicos que aumentan las propiedades mecánicas del material.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se construyó un modelo en *Acrylonitril-Butadien-Stiren* (ABS), utilizando la técnica de *Fused Deposition Modeling* (FDM) a partir de un diseño CAD de prótesis monocéntrica de rodilla para amputados transfemorales, usando el *software Solid-Edge* (figura 1). Con este diseño se realizó un análisis de las fuerzas que actúan en la pieza y la distribución de esfuerzos que se producen en condiciones de marcha normal por medio de la técnica de elementos finitos utilizando el *software Algor*. Esto se tradujo en una pieza geoméricamente modificada, estéticamente mejorada y que representa un menor desgaste energético por parte del usuario, debido a la disminución de peso obtenida después de hacer una reducción en el peso del conjunto articular.

Se utilizaron los programas *Solidcast* y *Solidflow* para simular los procesos de vaciado, flujo del metal fundido y solidificación de la pieza diseñada. Se realizó un proceso de iteración usando varias dimensiones de alimentador (como altura y diámetro) y diferentes condiciones de vaciado (temperatura del molde y del metal fundido).

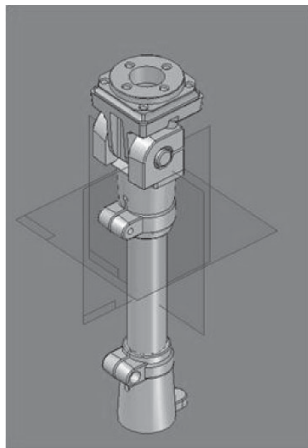


Figura 1. Pieza diseñada con el software Solid-Edge.

La pieza final fundida se vació en una aleación Al-7Si por la técnica del modelo perdido, utilizando una combinación de cáscara cerámica y molde grueso. Finalmente, se determinaron los valores de contracción netos para compararlos con los valores reportados por la bibliografía y tomarlos en cuenta en nuevas piezas fabricadas por este proceso.

Se obtuvo una primera pieza articular; luego se tomó el metal fundido restante y se vació en una lingotera con el fin de tornearse una probeta que cumpla con los estándares de la norma ASTM A 370 - 07a, la cual se llevó a ensayo mecánico en una máquina universal. Los resultados conseguidos sirvieron de referencia para realizar una nueva fundición, en la cual se implementó el dopaje con Mg y tratamiento térmico, lo cual mejoró la resistencia mecánica de la aleación de aluminio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis mecánico de la pieza

Se realizó el análisis mecánico de la pieza empleando el software Algor.

Se encontró que la pieza soporta las solicitaciones aplicadas durante la marcha, tomando como referencia a un individuo de 90 kg, en el momento de apoyar el talón, en el cual la fuerza reactiva es de 2,2 veces el peso corporal [1], lo cual equivale a 1.940 N.

El máximo esfuerzo se localizó en el eje articular, mostrando un buen desempeño en cuanto a la absorción de esfuerzos en el rango elástico (figura 2).

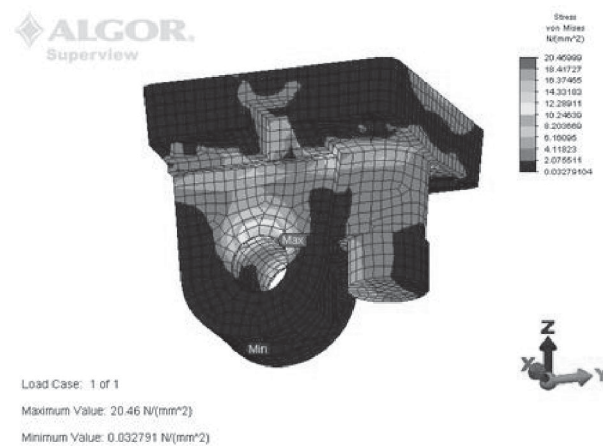


Figura 2. Máximo local de concentración de esfuerzos en Algor.

Rediseño de la pieza

Para efectuar el rediseño de la pieza utilizando herramientas CAD, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Eliminación de agujeros

Dado que la pieza superior requería un acople con el *socket*, se tomó en cuenta que cuando el aluminio se contrae, los agujeros para la tornillería que unen las piezas no coinciden; se fundió como bloque y los agujeros para la tornillería se realizaron después de fundir.

Angostamiento del eje de flexoextensión

El eje de flexoextensión no se eliminó; se redujo su diámetro 3 mm, para rectificarlo después de fundir.

Extrusión de caras de maquinado

Ya que las superficies de piezas obtenidas por fundición no son muy regulares, las caras laterales de la articulación que se encuentran en fricción durante la marcha se maquinaron de modo que se disminuyan los efectos tribológicos. Para compensar el material retirado por maquinado en estas dos superficies, se adicionaron 2 mm más de material en cada cara.

Escalado para compensar la contracción del aluminio

Para los diseños en CAD se debe considerar la contracción del material de fundición. Para tener en cuenta

ta esta contracción se realizó un escalado de las piezas de un 7% [2], contracción reportada por la bibliografía para el aluminio. Esto se hizo directamente desde *Solid-Edge*, realizando una copia de la pieza que se escala en un factor de 0,07.

Diseño del alimentador cimero

Los alimentadores son un volumen de material adicional a la pieza de interés que se va a fundir, los cuales sirven para que los rechupes y porosidades que se producen por el efecto de la contracción líquido-sólido del metal se formen en ellos y no en la pieza de interés, lo cual permite obtener piezas estructuralmente “sanas”, esto es, con un índice de integridad superior al 99%.

Ubicación del alimentador cimero en la pieza, según el criterio del método de los círculos

El alimentador cimero debe tener un tiempo de solidificación mayor que el de la pieza, permitiendo que a medida que el metal se solidifica en la pieza de interés, el metal aún líquido en el alimentador fluya hacia la pieza, evitando la aparición de espacios vacíos en la pieza. El método de los círculos consiste en realizar cortes coronales, sagitales u horizontales para encontrar cuál es el círculo con mayor diámetro inscrito en la pieza (buscando que estos círculos coincidan con esferas volumétricas contenidas *in situ*). El lugar donde se encuentre este círculo indica el espacio con mayor volumen [3]. Ya que la eficiencia en la transferencia de calor depende del área de contacto con el molde, la colada que se encuentre en esta zona será la que tenga mayor volumen y menor área de contacto con el molde, por lo cual será la última en solidificar; esto implica que el alimentador debe ubicarse cerca de esta zona, con el fin de suministrar metal fundido hasta el momento en que se solidifique todo el material.

Cálculo del volumen según el factor de forma

El volumen de la mazarota se calcula después de haber escalado la pieza, ya que los cálculos deben hacerse para el volumen del metal líquido. Se recurrió a las gráficas del *ASM Handbook* [4], donde se relaciona el volumen relativo del alimentador cimero (*riser/casting*) con el factor de forma de la pieza (*length+width/thickness*).

Según el factor de forma encontrado para la pieza ($V/A = 4,5$), se encuentra que el volumen del alimentador debe ser del 70% del volumen total de la pieza. Para efectos prácticos, se sobredimensionó hasta un 75% del volumen de la pieza. Esto para conservar la integridad y evitar que el rechupe la alcance.

Diseño geométrico

Para hacer el diseño, se debe tener en cuenta que el volumen de éste (tomando como forma geométrica un cilindro) depende del diámetro y de la altura, para lo cual se trabajó con $b = 1,5 D$ (h =altura, D =diámetro), para asegurar que el rechupe en la parte superior del alimentador esté alejado de la pieza, lo cual se garantiza siempre que $h > D$ [5]. Para la relación descrita se obtienen $b = 5,138$ cm y $D = 3,42$ cm.

Sistema de colada

Ya que la geometría de la pieza que se va a vaciar no es compleja, se empleó la mazarota como conducto de vaciado.

Simulaciones en Flow-Cast y Solid-Cast

Para realizar la simulación de vaciado y solidificación de la fundición en *Flow-Cast* y *Solid-Cast*, es importante tener en cuenta lo siguiente:

- Material: tipo de aleación, temperatura inicial (temperatura óptima de vaciado), tiempo de vaciado.
- Molde: temperatura inicial (precalentado), coeficiente HT (para moldes metálicos), criterio de Niyama.
- Sistema de colada:
 - El molde debe estar lleno antes de la primera solidificación (tiempo de vaciado).
 - El flujo en el molde no debe ser turbulento (a mayor área, menor velocidad).
 - Llenado uniforme de la pieza (no es recomendado el vaciado por el alimentador, ya que éste debe ser lo último que se solidifique).

Para la primera simulación se utilizaron las siguientes variables:

- Material: aluminio
- Temperatura: 750 °C.

- Alimentador: volumen: 81 cm³, H=D=4,7 cm.
- Prioridad: pieza=1, alimentador=2 (la pieza y el alimentador se deben diseñar aparte).
- Malla=4.000.000 nodos.
- Temperatura de molde: 550 °C.

En los resultados obtenidos por la simulación se puede observar cómo la solidificación no es la esperada, puesto que no se da direccionalmente en sentido hacia el alimentador, y debido a la alta temperatura del molde, vemos cómo se solidifica más rápidamente el alimentador que está expuesto al ambiente, formando el rechupe en la pieza.

Proceso de llenado

En la figura 3 se puede observar cómo se produce el llenado del molde y el cambio en la temperatura a través del tiempo en el conjunto pieza + alimentador. Las líneas negras que se observan en la figura son las líneas de flujo.

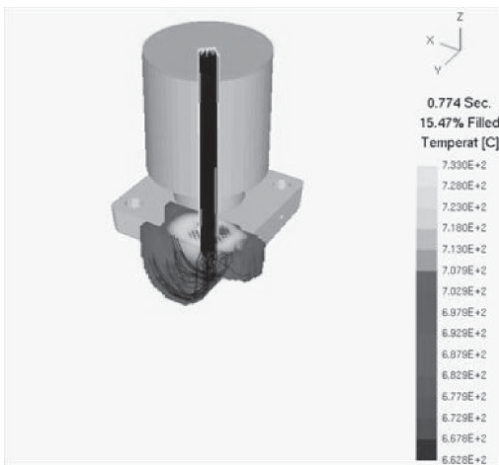


Figura 3. Nivel de llenado del molde a 0,774 s (15,47%).

Proceso de solidificación

En la figura 4 se puede observar cómo se da la solidificación del conjunto pieza + alimentador.

Como se observa en cada una de las gráficas, el gradiente de temperatura se produce desde el centro de la pieza (el color azul es el metal líquido y el color gris es el metal en estado sólido), donde está más caliente el metal hacia las paredes que se encuentran en

contacto con el molde. Se obtuvo una solidificación radial en el interior de la pieza, lo cual predice la formación de defectos internos.

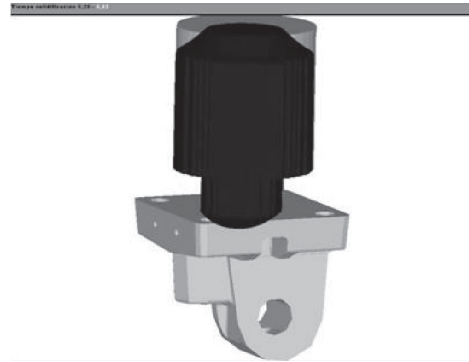


Figura 4. Solidificación para t=5,25 s.

La menor temperatura se presenta en la parte inferior de la pieza y la mayor temperatura en la parte superior, corroborando el comportamiento esperado por la técnica de los factores de forma para proveer la solidificación direccional, es decir, de abajo hacia arriba y de afuera hacia adentro, por lo que concluimos que el alimentador se encuentra en una buena posición y que debemos mejorar este proceso variando la temperatura.

Iteración

Para corregir los defectos obtenidos en la primera fundición, se procedió a realizar una nueva simulación y fundición tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- Temperatura: 650 °C.
- Alimentador: Volumen: 81 cm³, H=D=4,7 cm.
- Prioridad: Pieza = 1, alimentador = 2 (la pieza y el alimentador se deben diseñar aparte).
- Malla=4.000.000 de nodos.
- Temperatura de molde: 150 °C.

Con esto se obtuvo una solidificación direccional en sentido ascendente, desde la pieza hacia el alimentador. Este tipo de solidificación direccional hacia el alimentador garantiza que los defectos aparecerán en el alimentador y no en la pieza de interés.

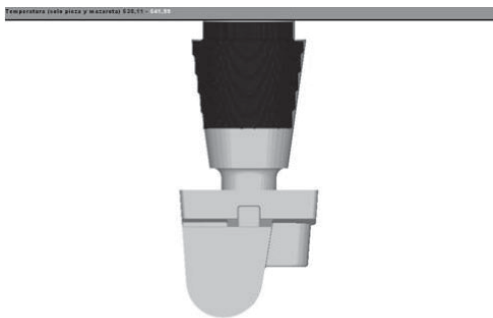


Figura 5. Solidificación direccional.

Conversión del archivo para prototipado rápido

Para trabajar con la pieza diseñada se debe hacer una conversión del archivo de *Solid-Edge*, a un formato que sea reconocido por la máquina de prototipado rápido SST 1200. El archivo estándar del prototipado rápido es el .STL, el cual utiliza una malla de pequeños triángulos para definir la geometría del objeto. El número de triángulos lo puede definir el usuario o autodefinirlo el *software*, tomando en cuenta que para definir geometrías esféricas se debe emplear un mayor número de triángulos, lo que también se traduce en un mayor peso del archivo.

Precision Casting, fabricación de la pieza

En la fundición a la cera perdida, el modelo se fabrica en cera o plástico. En este caso se fabricó en ABS. Al modelo de ABS se adosó un alimentador de cera/parafina (50-50) a partir de un molde de silicona, con las dimensiones descritas en el diseño geométrico.

Luego, este modelo se lavó con jabón líquido neutro como surfactante y se recubrió con una primera capa de sílice coloidal (Ludox HS-20%)/cromita malla -325 con una viscosidad equivalente a un tiempo de vaciado en la Copa Ford No. 4 de 50 segundos [6]. Esta primera capa se arenó con zirconita malla 50/70. La segunda y la tercera capas se hicieron con una capa de menor viscosidad (20 segundos) y se arenaron con chamote malla 50/70. Se usó como respaldo un molde grueso con revestimiento KerrCast 2000.

El molde se desceró a 150 °C por dos horas y se calentó entre 850 - 900 °C por hora y media, luego de lo cual se dejó enfriar en el ambiente hasta alcanzar una temperatura entre 100 y 150 °C para su colado. El aluminio fue vaciado en aleación Al-7Si (ASTM A356.0)

en horno eléctrico de crisol, desgasificando con una pastilla de Degasser y posteriormente con nitrógeno UAP (99,999% de pureza) a 5 CFH (pies cúbicos por hora) por cinco minutos. El chequeo de la gasificación se hizo con la técnica de la presión reducida (1 torr) y el vaciado del metal se realizó a 750 °C inicialmente y luego a 650 °C.

En la figura 6 se observa un corte de la pieza final fundida, donde se muestra la sanidad estructural de las piezas vaciadas a 750 - 550 °C metal-molde y 650 - 150 °C metal-molde.



Figura 6. a) Pieza obtenida con defectos internos. b) Pieza obtenida sin defectos internos.

Mejoramiento de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio

Fundición 1. Se fundió una aleación Al-2Si en horno eléctrico de crisol, en cantidad de 3 kg. El vaciado del metal se realizó a 700 °C en lingotera metálica.

Composición química. La aleación vaciada corresponde a un aluminio bajo silicio, del tipo Al-2Si, según se muestra en la tabla 1.

Tabla 1
Composición química de la aleación Al-2Si

Ai	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
94,952	1,502	0,729	1,951	0,212	0,064	0,021	0,047
Zn	Ti	V	Pb	Sn	Ca	Zr	
0,472	0,015	0,003	0,024	0,003	0,000	0,005	

Evaluación de las propiedades mecánicas. Se utilizó la norma ASTM A 370-07 para ensayo de tracción. La probeta ensayada se muestra en la figura 7.

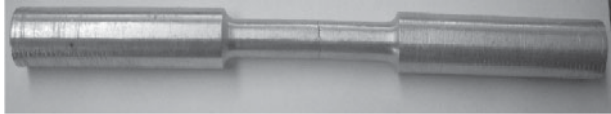


Figura 7. Probeta fallada en ensayo de tracción.

El análisis posterior a la prueba evidenció que la probeta no presentó encuellamiento, con fractura frágil y de aspecto plano, sin picos importantes que sobresalieran en su superficie; no hubo deformaciones hasta 12,5%. La dureza registrada por esta muestra es de 25 HB. Presentó los datos de 12,5 y 18,3 kgf/mm².

Microestructura

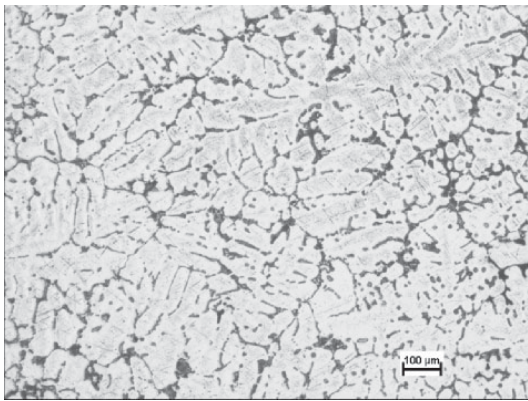


Figura 8. Metalografías de la aleación Al-2Si revelada con HF al 5%.

En la figura 8 se observan dendritas primarias de aluminio (blancas) con compuesto interdendrítico en una red continua de precipitados, a un $\times 100$ de 100X. Se encuentran también partículas ricas en hierro con gran presencia de porosidad, ubicados en las últimas zonas solidificadas.

Estos resultados concluyen que la aleación Al-2Si, por sus bajas propiedades mecánicas y deficiente sanidad estructural (poros con presencia de hierro), no cumple los requerimientos de diseño de la exoprótesis.

Fundición 2. Para mejorar las propiedades mecánicas, se propuso estudiar la aleación ASTM A357.0 [7]. Con este fin, se adicionan cantidades mayores de silicio (7%) y magnesio (0,6%). Adicionalmente, se efectúa un tratamiento térmico T6 (proceso de solución más envejecimiento). Estas aleaciones presentan la característica de retener en su matriz el magnesio (en forma de siliciuro de magnesio Mg₂Si) después del tratamiento en la etapa de temple, el cual se encuentra disponible para la precipitación durante el proceso de envejecimiento.

Se fundió la aleación Al-Si-Mg en horno eléctrico de crisol. La aleación se desgasificó con nitrógeno UAP grado 5,0 (99,999% de pureza) a 5 cfh (pies cúbicos por hora) por cinco minutos. El grado de desgasificación se evaluó con la técnica de la presión reducida (1 torr). El vaciado del metal se realizó a 700 °C en lingotera metálica.

El proceso del tratamiento térmico T6 se observa en la figura 9.

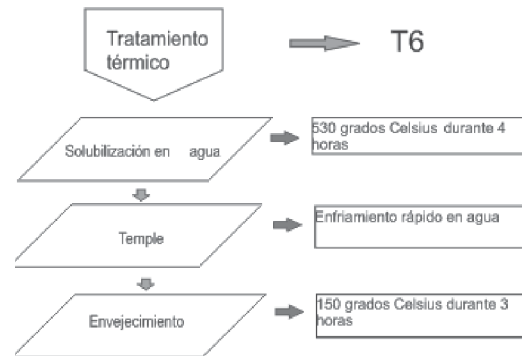


Figura 9. Proceso para realizar el tratamiento térmico T6.

Composición química. La segunda aleación vaciada corresponde a un ASTM A357.0 del tipo tipo Al-Si-Mg (tabla 2).

Tabla 2
Composición química de la aleación Al-Si-Mg.

Ai	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
92,871	6,098	0,201	0,089	0,017	0,662	0,010	0,023
Zn	Ti	V	Pb	Sn	Ca	Zr	
0,012	0,002	0	0,006	0,004	0,001	0,004	

Evaluación de propiedades mecánicas. Con las mismas especificaciones técnicas de la probeta anterior, se realizó una prueba de tracción a la nueva fundición.

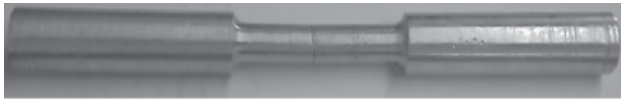


Figura 10. Probeta fallada en ensayo de tracción de la aleación Al-Si-Mg. No se observa cuello en el área de fractura.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla 3, donde se comparan los dos materiales ensayados

Tabla 3

Propiedades mecánicas presentadas por los materiales Al-Si y Al-Si-Mg, al someterlas a prueba de tracción

	Límite elástico (0,2%)(%fgf/mm ²)	Fuerza máxima (kgf)	Resistencia a la rotura (kgf/mm ²)	Resistencia máxima (kgf/mm ²)
Al-Si	12,5	2170	18,1	18,3
Al-Si-Mg (con tratamiento térmico T6)	18,6	2810	23,3	23,3

Después de realizar el análisis de los resultados, se encontró que el aspecto de la fractura es de aspecto frágil y sin picos sobresalientes importantes. Registra un incremento considerable en los valores de límite elástico (cercano a 150%) y resistencia máxima (130%). La dureza se incrementó de 25 a 45 HB (180%), en comparación con la aleación Al-Si.

Microestructura

Se observan dendritas primarias de aluminio (blancas), con compuesto interdendrítico del tipo Mg₂Si y silicio metálico (gris plomo). No se observa porosidad en las regiones interdendríticas.

Estos resultados concluyen que la aleación Al-Si-Mg, por sus altas propiedades mecánicas y mejor sanidad estructural (sin poros de gasificación), cumple los requerimientos de diseño de la exoprótesis.

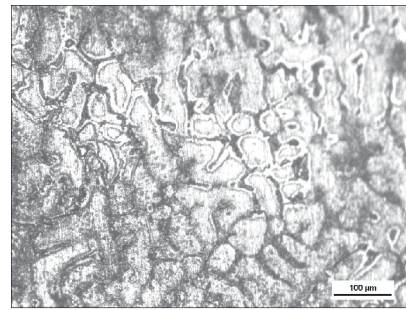


Figura 11. Metalografías de la aleación Al-Si-Mg revelada con HF al 5%.

CONCLUSIONES

Por la técnica de prototipado rápido se pueden fabricar piezas de geometrías muy complejas, las cuales se generan desde cualquier *software* CAD.

Se demuestra que las piezas en ABS son una opción satisfactoria para realizar la técnica de fundición de precisión del modelo perdido.

Es importante hacer el escalado en CAD de la pieza para tener en cuenta la contracción del material y los sobreesesores de maquinado, y además, proveer un buen diseño alimentación y vaciado. En este caso, por la geometría simple de la pieza, se usaron las técnicas de los círculos inscritos y el método naval. Mediante la simulación con *Solidcast* y *Solidflow* se mostró que la mazarota, como sistema de colada, no genera flujos turbulentos y produce una pieza estructuralmente sana.

Se demuestra que los programas de simulación constituyen una buena base de partida para la producción de piezas resistentes mecánicamente y estructuralmente sanas. Con ello se economiza material, se evita que las piezas salgan deficientes y se ayuda a optimizar tiempo, material y costos a la hora de llevar un diseño de una pieza a su proceso de manufactura.

Se comprobó que la adición de Mg en las aleaciones de aluminio y el tratamiento térmico realizado aumentan las propiedades mecánicas de la aleación, observándose un aumento especialmente en la resistencia a la tracción y el límite elástico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Andrés Torres, de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, por su colaboración en las piezas de prototipado rápido.

Agradecimientos

A Ricardo Aristizábal, del Taller de Fundición de la Universidad de Antioquia, por su asesoría con los programas de solidificación y vaciado.

A Luis Fernando Rueda, del Centro Metalmeccánico del Sena, por su apoyo en la caracterización del material.

REFERENCIAS

- [1] Nordin, Margareta & Frankel, Viktor. Biomecánica básica del sistema músculo-esquelético. *Biomecánica de la marcha*, 3ª ed.
- [2-5] American Society for Metals (1988). *ASM Handbook, Casting*, Vol. 15.
- [6] Echavarría, A. (1990). *Fundición de precisión a la cera perdida*. Universidad de Antioquia, Ceset.
- [7] American Society for Metals (1988). *ASM Handbook, Casting*, Vol. 15.