



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Diseño y configuración de molde progresivo para dispositivos mecánicos de tracción

Progressive mold design and configuration for mechanical traction devices

Cano-Figueroa, M.A., Pérez-Bustamante, R.

Posgrado CIATEQ A.C., Sede Hidalgo. Centro de Tecnología Avanzada, A. C., Av. Diésel Nacional #1, Parque Industrial Ciudad Sahagún, C.P. 43990, Tepeapulco, Hidalgo, México.
angeli_cano@hotmail.com; raul.perez@ciateq.mx

Innovación Tecnológica: Molde único de amplia configuración para manufacturar piezas en fundición.

Área de aplicación Industrial: Desarrollo y mejora de los procesos de fabricación de moldes.

Recibido: 09 agosto 2021

Aceptado: 24 enero 2022

Abstract

Nowadays, the manufacturing processes of mechanical traction devices require permanent molds for their manufacture, with the maximum possible geometric equivalence to the part to be obtained by casting. To this end, it is essential that the mold has a defined internal shape, high resistance to deformation, high useful life for mass production and easy manoeuvrability. Having molds within the casting line guarantees the obtaining of mechanical traction devices. The design and manufacture of a mold is equivalent to obtaining a single model of a previously defined device; therefore, requiring sufficient models implies having the same number of molds. The purpose of this research was to design and fabrication of a progressive dimensional mold with an internal footprint of 154.2 mm, which obeyed a configuration algorithm for the assembly of several models within a single mold. With the purpose of substantially reducing the massive manufacture of molds for traction devices per unit, thus, the implications of all kinds generated by the development and manufacture of these costly tooling. This was achieved by means of computer aided design (CAD), physical geometric approximation (PR), electroslog remelting (ESR) and rapid manufacturing (RM), which contributed to the integral fabrication of the elements of an 11-element permanent progressive mold. Thus generating a system - mold, configured from a base model 1R to 4R with 2 archetypes. The above by means of 4 compatible elements, 6 interchangeable for R cavities and

2 optional, reaching a progressive of up to 8 possible models + 14 variants with their respective archetypes. The results obtained demonstrated that the progressive design maximizes the incremental configuration possibilities, since a base graduation, projected the compatibility requirements between interchangeable components, propitiating successive and scalable models, with coincidence by model superior to 98% to the positive one. This exceeded the initial physical geometric prototype by 1.3% on average, so the high affinity between the manufactured elements of the progressive mold outperforms conventional molds considerably. The motivating factors of the project showed significant results in the permanent mold, these on the design and prototyping, primarily from the material used, manufacturing methods, assembly tests and expected results, achieving the maximum desired value. This mold will have an insertion in the rapid manufacturing line, where the mechanical traction devices are obtained, its effectiveness in the dimensional succession will allow to obtain different models according to the scope of the design.

Keywords: Assisted design, permanent mold, progressive, scalable, incremental.

Resumen

En la actualidad los procesos de fabricación de dispositivos mecánicos de tracción, requieren de moldes permanentes para su fabricación, con la máxima equivalencia geométrica posible a la pieza que se desea obtener mediante la fundición. Para ello es esencial que el molde posea una forma interna definida, alta resistencia a la deformación, elevada vida útil para fabricación masiva y de fácil maniobrabilidad. Contar con moldes dentro de la línea de fundición, garantiza la obtención de dispositivos mecánicos de tracción. El diseño y fabricación de un molde equivale a la obtención de un modelo único de dispositivo previamente definido, por lo tanto, el requerir de modelos suficientes implica contar con el mismo número de moldes. El propósito de la presente investigación era diseñar y fabricación de un molde progresivo dimensional con huella interna de 154.2 mm, que obedeciera a un algoritmo de configuración para el ensamble de varios modelos, dentro de un solo molde. Con el propósito de reducir sustancialmente la fabricación masiva de moldes para dispositivos de tracción por unidad, con ello así, las implicaciones de todo tipo que genera el desarrollo y manufactura de estos costosos herramientas. Lo anterior se logró por medio del diseño asistido por computadora (CAD), la aproximación geométrica física (PR), la refundición de electroescoria (ESR) y la manufactura rápida (RM), quienes coadyuvaron a la fabricación integral de los elementos de un molde progresivo permanente de 11 elementos. Generando así un sistema - molde, configurado de un modelo base 1R hasta 4R con 2 arquetipos. Lo anterior por medio de 4 elementos compatibles, 6 intercambiables para cavidades R y 2 opcionales, alcanzando un progresivo de hasta 8 posibles modelos + 14 variantes con sus respectivos arquetipos. Los resultados obtenidos demostraron que el diseño progresivo maximiza las posibilidades configuración incremental, ya que una graduación base, proyectó los requerimientos de compatibilidad entre componentes permutables, propiciando modelos sucesivos y escalables, con coincidencia por modelo superior al 98% al del positivo. Esto rebaso al prototipo físico geométrico inicial en 1.3% en promedio, por lo que la alta afinidad entre los elementos fabricados del molde progresivo sobresale a los moldes convencionales de forma considerable. Los factores de

motivación del proyecto mostraron resultados significativos en el molde permanente, estos sobre el diseño y prototipado, primordialmente a partir del material empleado, métodos de fabricación, pruebas de ensamble y resultados esperados, consiguiendo el máximo valor deseado. Este molde tendrá una inserción en la línea de manufactura rápida, donde se obtienen los dispositivos mecánicos de tracción, su efectividad en la sucesión dimensional permitirá obtener diversos modelos de acuerdo al alcance del diseño.

Palabras clave: Diseño asistido, molde permanente, progresivo, escalable, incremental.

1. Introducción

En los procesos de fundición y conformación de piezas en aluminio, se utilizan moldes de todo tipo, estos pueden ser desechables, permanentes o semipermanentes (1; 2), con la finalidad de obtener piezas con similitudes al patrón o huella interna de este (3). Las técnicas empleadas durante la colada por gravedad representan ventajas para el proceso de obtención por medio de moldes bipartidos (4). Los moldes como medio de máxima aproximación geométrica del metal fundido a piezas finales, justifica la demanda y fabricación de estos, ya que propicia la masiva producción de piezas de diversa tipología (5).

Los moldes permanentes son de los más demandados cuando se requiere de una alta reproducción de piezas (1), ya que su reutilización obedece a la estabilidad de forma y fácil conformación (6), esto implica, contar con tantos moldes como desiguales piezas se requiera fabricar. La función del molde dentro del proceso, permite diversos materiales de vaciado (7), métodos de trabajo y técnicas de extracción (8), para lo anterior se debe procurar el cumplimiento a parámetros precedentes de diseño, que aprueben que el molde, se comporte estable durante su ciclo operativo (9), como lo es: resistencia térmica y estabilidad dimensional, control conocido de la deformación del material y conocimiento del desempeño bajo tiempos y escalas de trabajo (10). Idealmente deberá soportar variantes de ciclos térmicos prolongados y

reiterados sin relajación, agrietamiento ni corrosión, (11). Las diversas formas que puede tener un molde, se apegan al diseño y requerimiento derivado de una necesidad que propicia su creación, puede ser tan simple o complejo como este lo demande (12).

Diseñar un molde requiere conocer, considerar y proyectar las exigencias que maximicen los beneficios de las formas de la futura huella o cavidad interna de este (13), reconocer las tolerancias necesarias para su óptimo desempeño durante el proceso (14), en piezas que conforman el molde, paredes, bebederos y elementos de cierre, inclusive la conveniencia de la forma externa, dependiendo del alojamiento final (15). Actualmente la industria de fabricación de moldes, tiene alta demanda y relativa pronta respuesta a la manufactura de estos de forma global, según la FEAMM y PF-MEX. Su producción implica diversos métodos de concepción, por ejemplo: fabricaciones primarias bajo patrón o muestra, diseño y manufactura asistido por ordenador, prototipado de moldes y en una gran mayoría de los casos, la construcción por medio de prueba y error, lo que permite ajustar los inconvenientes del modelo bajo consecutivos ajustes experimentales, hasta alcanzar su mejor operatividad (16).

Lo anterior puede representar en cierto grado un compromiso con el coste de fabricación, material, tiempo y resultado del molde, siempre debe imperar que la calidad subsista durante todo el ciclo de vida (17). Los

dispositivos mecánicos de tracción, son elementos ampliamente utilizados en los arreglos de transmisión, variación y conservación de potencia (18), su demanda en el mercado obedece a especificaciones particulares, ya sean de la gran variedad de línea o bien de una fabricación especial derivada de un diseño explícito (19). Estos dispositivos, son fabricados por empresas que cubren dichas especificaciones, utilizan moldes de todo tipo para su conformación, en gran medida los moldes permanentes, lo que implica, fabricar un molde por unidad de dispositivo de línea, en ocasiones con moldes para dispositivos especiales si el costo beneficio es conveniente (19; 20). Conocido es el avance tecnológico hoy en día, donde los procesos requieren optimizar los desarrollos en moldes, opciones como prototipado, permiten que un producto se aproxime a varias dimensiones de utilidad (17). Por lo tanto, ideal es el diseño que proyecte el mayor número de dimensiones útiles en un molde, siendo candidato a suplir varias funciones sucesivas (21).

El presente trabajo de investigación se desarrolló para una empresa fabricante de dispositivos mecánicos de tracción en aluminio, quien demandaba un diseño de molde, capaz de integrar gradualmente dimensiones de elementos de un mismo orden, escalable por arquetipo y cavidad, de ensamble sucesivo y graduación permanente, con la finalidad de migrar a un molde incremental, lejano a los moldes ordinarios existentes actualmente, con la finalidad de anular la fabricación de moldes por unidad y maximizar el número de modelos a obtener en un nuevo y único molde, capaz de insertarse a la línea de manufactura.

La estructura del documento detalla la metodología de diseño, destacando el requerimiento y precisión para el molde. Se desarrolla el diseño del positivo y negativo, el análisis del canal de vertido y ángulos de desmolde, diseño 2D, 3D de los elementos y la simulación progresiva del sistema. Por último, se detalla la comprobación experimental del diseño, moldeo de las partes, selección de materiales de fabricación, fundición, tratamiento térmico, maquinado y correspondencia de las partes del molde permanente fabricado.

2. Materiales y equipos

Los elementos del molde fueron diseñados en el software Solidworks (2; 11; 19) y los negativos de coincidencia comprobados en el software Creo Parametric (27; 28; 31). Estos se prototiparon en madera de pino y acabaron en resina fotocurable por el método DLP (17; 20; 21; 24). Las piezas se moldearon en arena verde, para su posterior fundición en acero H13 (3; 10; 13; 32) por medio de horno eléctrico + refundición de electroescoria ESR (5; 7; 9), posteriormente un tratamiento térmico simple QST (26; 33) y un acabado por shoot blast a las piezas maquinadas por RM (4; 8; 34) con guía en las hojas de proceso correspondiente.

3. Métodos experimentales

Se privilegió la necesidad que debería cumplir el diseño del molde, para el alcance específico esperado. La empresa solicitante indicó el modelo potencial como plataforma de diseño, con base en ello se desarrolló la metodología de trabajo (22), paso a paso, como se muestra en la Figura 1.

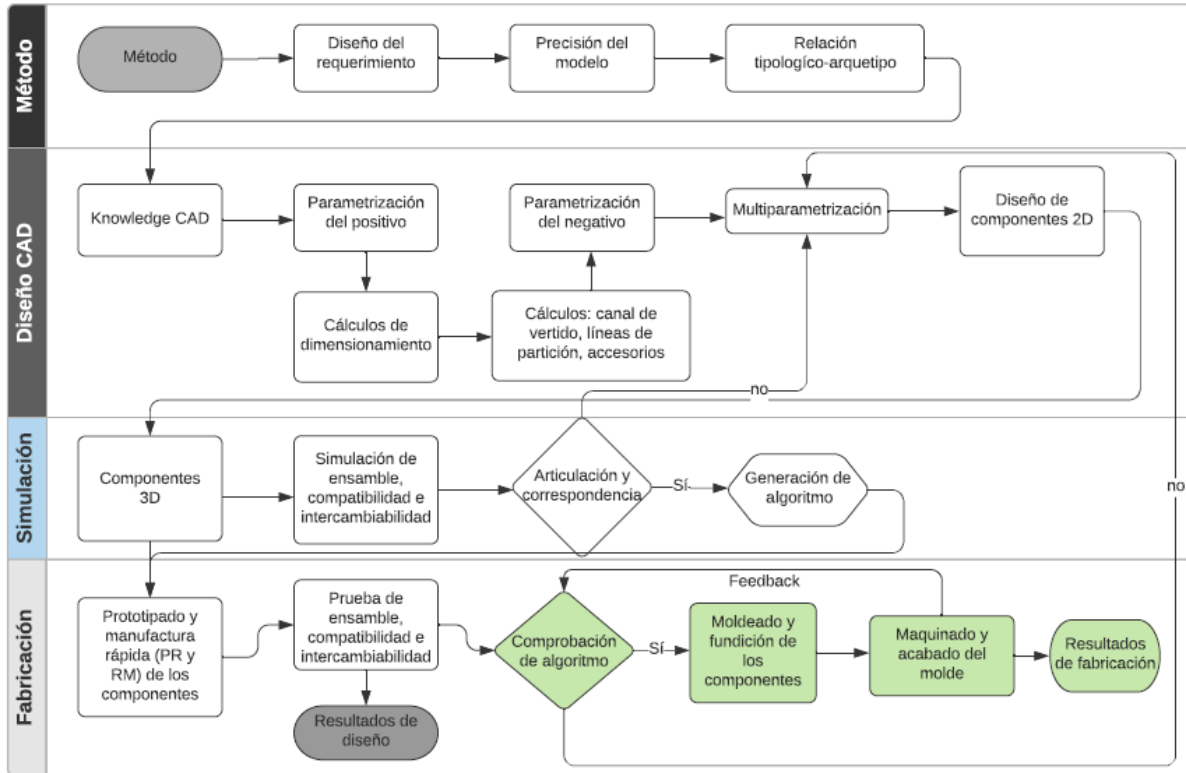


Figura 1. Método propuesto para el diseño el molde.

3.1 Diseño de requerimiento

Se estima que los moldes permanentes se pueden utilizar de forma repetida para obtener un gran número de piezas iguales, con un

alcance de hasta 40,000 fundiciones (23; 3). Para el presente trabajo se delimitaron los requerimientos de control, maximización y ensamble necesario en el molde, como se muestra en la Figura 2.

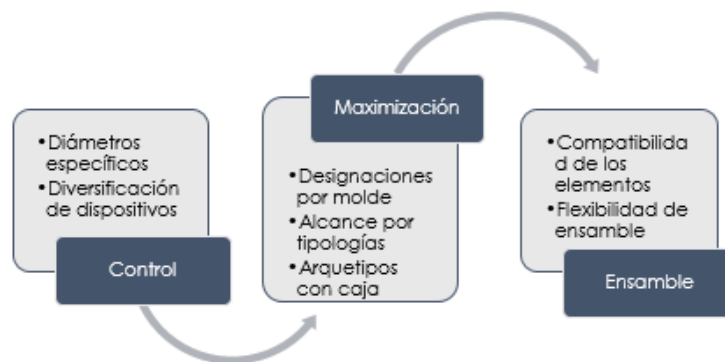


Figura 2. Requerimientos a cumplir por el molde progresivo.

Lo anterior, estimó los alcances en un modelo básico en particular para dispositivos, con la finalidad de actuar como plataforma en la multiplicación en modelos posteriores.
















3.2 Precisión de modelo

Una vez que se identificaron los requerimientos generales del molde, se seleccionó un grupo de dispositivos mecánicos

de tracción de 152.4 milímetros de diámetro; con modelos de ranura de 1, 2, 3 y 4 R, arquetipos disponibles en A y B, cavidades P, D y P/C, como objeto de estudio. Estos aportaron el detalle de trazo interno del molde, así como los parámetros de control de todo el proceso de diseño, cabe destacar que el grupo dimensional seleccionado, pertenece a unidades de amplia demanda industrial y nula

compatibilidad entre moldes convencionales, siendo el reto del diseño. El alcance del molde precisaba cumplir con características de base, ensamble, compatibilidad e intercambiabilidad progresiva entre el modelo y el molde, así como una alta relación entre los diseños, arquetipos y cavidades, como muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Progresión permisible del modelo en el molde.

| Precisión del modelo: 152.4 mm | | | | | | | Precisión del Molde |
|--------------------------------|---|-----------|----------|---|---|---|--|
| Modelo | Diseño | Arquetipo | | Cavidades | | | |
| | | A | B | P | D | P/C | |
| 1R |  | ✓ | ✓ |  |  | | P R O G R E S I V O |
| 2R |  | ✓ | ✓ |  |  |  | |
| 3R |  | ✓ | ✓ |  |  |  | |
| 4R |  | ✓ | ✓ |  |  |  | |
| Total | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | I=23 |

La estimación progresiva del molde se maximizó por medio de las depresiones y cavidades cónicas, en respuesta a la alta exigencia en el mercado de consumo, puesto que este reduce considerablemente el peso del dispositivo en el eje motriz y/o en el de arrastre (9).

3.3 Diseño del molde

En el desarrollo analítico de las geometrías, se logró proyectar de forma integral para cada una de las precisiones de los dispositivos del objeto de estudio, siendo esta la primera fase. Para ello, se inició con la concepción de los requerimientos para un modelo geométrico funcional, innovando el uso espacial y puramente geométrico, es decir, se utilizaron analíticamente para la comprobación de los acoples y la concordancia de los dispositivos

dentro del molde, así como la forma de esta última. De acuerdo a Nages (24), las geometrías 3D para la construcción de modelos y prototipos son mucho más eficientes por medio de entornos virtuales CAD. Lin & Quang (12) generaron de forma automática regiones para separar diseños de varias piezas en un mismo molde.

Se realizó un diseño digital con los datos del positivo (dispositivo mecánico de tracción) contrapuestos al negativo (huella del molde) para su funcional concordancia, con las tolerancias y contracciones de trabajo (14), el material de colada y del material del molde (25, 26).

Se requirió de la gestión del conocimiento a detalle de nuevas consideraciones en cuanto a dimensiones, tolerancias y nuevas

ajustes no disponibles al modelo existente (1), con la finalidad de evolucionarlo a un nuevo diseño geométrico, mediante el uso de los instrumentos Knowledge del CAD, se utilizó el software: SolidWorks. En él, se crearon y simularon los ensambles por coincidencia de componentes, así como el control del entorno dimensionado.

Los sólidos de los dispositivos de este molde se apegaron a los estándares DIN 7752 e ISO 4184, ya que normalizan el ancho para la banda trapezoidal en la ranura del dispositivo mecánico de tracción, donde el arquetipo en milímetros $A=12.7 \times 12.7$ y $B=15.87 \times 15.87$, en ancho superior (b_0) y profundidad (h), respectivamente, con un ángulo de canal de $37^\circ \pm 1^\circ$, como se muestra en la Figura 3.

3.3.1 Diseño del positivo

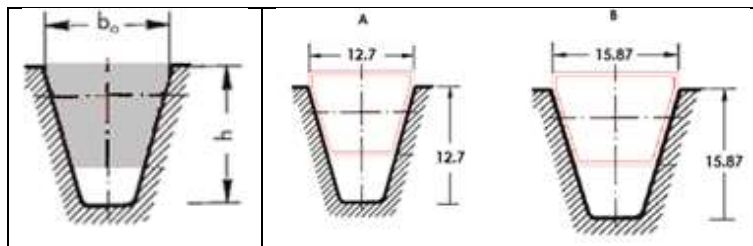


Figura 3. Arquetipo normalizado del dispositivo.

Se respetaron todos los posibles comportamientos durante el diseño de 7 dispositivos mecánico para el positivo. Lo anterior garantizó que las tareas repetitivas de

diseño permanezcan y no se modifiquen, se estimó el volumen por dependencia de acuerdo al modelo por cavidades, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño CAD de los elementos del positivo del molde.

| Diseño 2D de los dispositivos mecánicos de tracción | | | | | |
|---|--------|--------------------------|---------------------------|-----|---------------------------|
| Diseño | Diseño | Volumen de los positivos | | | |
| | | P y D | V= | P/C | V= |
| 1R | | | 464245.52 mm ³ | - | - |
| 2R | | | 870644.71 mm ³ | | 825252.54 mm ³ |
| 3R | | | 1201827.3 mm ³ | | 1156435.1 mm ³ |
| 4R | | | 1532846 mm ³ | | 1487453.8 mm ³ |

En el CAD 2D, se desarrolló la totalidad de las geometrías mínimas y se comprobó por medio de mallas de coincidencia, que no se presentaran errores u omisiones.

3.3.2 Diseño del negativo

Una vez concluidas las geometrías que rigen la huella, se procedió al diseño de las partes que conformaron el molde. Para ello, fue imperante el control del diseño paramétrico, ya que este asignó dimensiones, formas y materiales de correlación entre el positivo y negativo, derivado de cada requerimiento característico de los modelos que lo formaron, en concordancia con el diseño variacional, donde se consideraron los factores dependientes del proceso y los cambios a los que estará expuesto el molde. Retomando que, los arquetipos de alcance en el diseño son A y B, quienes fueron las variantes dimensionales de grupo, la sucesión y escalamiento, en el número de estos dentro del molde, se creó un complejo sistema dependiente del ensamble coincidente, por lo que la correcta definición, impero en el diseño negativo del molde, específicamente para los componentes ranurados, las dimensiones se representan en milímetros, como se muestra en la Figura 4. En ello se consideraron las contracciones de 1.3% (5) y dilataciones mínimas y máximas que oscilan entre el 3.8% para las aleaciones y 7.1% para aluminio respectivamente (14; 24). Lo anterior derivado, de la necesaria disponibilidad del molde para diversos tipos de fundiciones de aluminio y sus combinaciones.

Las consideraciones antes mencionadas, propiciaron la emisión del negativo para las ranuras del dispositivo de tracción, en un modelo prototipo, ambas formaron la huella interna de las ranuras sobredimensionadas A y B. Estas se establecieron para dos tipos de cuerpos ranurados: 1 R y 2 R, mostradas en la Figura 4.

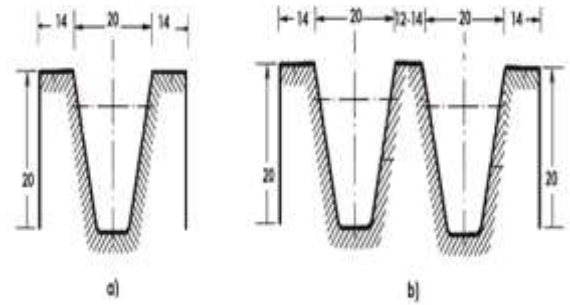


Figura 4. Parametrización de los negativos para cuerpos ranurados del molde.

De acuerdo con Marcos (27), la parametrización de un negativo, controla las dimensiones de diseño desde las propias piezas dentro del ensamble.

El diseño para los cuerpos ranurados, se basó en la asignación de relaciones entre las geometrías contenidas y el CAD del molde, como se muestra en la Figura 1, con ello imperó la certeza del cumplimiento de las características matemático visuales en 3D siguientes: visibilidad del estado del sistema, correspondencia entre lo requerido y lo esperado, formalización de un diseño adecuado para prevención de errores, flexibilidad y eficiencia de ensamble simulado, como menciona Klochkov (28), en la parametrización continua de figuras. Lin & Quang (12) diseñaron y fabricaron un molde capaz de separar varias piezas en el negativo, con la diferencia de ser simultaneas, sin embargo, no obedecen a un algoritmo para su máxima configuración.

3.3.3 Dimensionado del canal de vertido

La mazarota es un depósito voluminoso de metal líquido, se coloca en zonas críticas o estratégicas del molde, con la finalidad de ejercer un contener el mayor tiempo posible el metal fundido en estado líquido, este debe intervenir como reserva de material durante el proceso de solidificación y contracción de la pieza fundida, de acuerdo con Askeland (29).

Ahora bien, considerando que en el molde que se desarrolló debía optimizarse en material y funcionalidad, se sobre utilizó el depósito contenedor como cono superior y canal de vertido del dispositivo mecánico de tracción, esto bajo los criterios de diseño de bebederos de la pieza, Jami (30) menciona que los bebederos pueden optimizarse con base a la ASTM B-108 (31): por módulo de enfriamiento del cono (mayor al módulo de enfriamiento de la pieza).

El cálculo se rigió por el criterio de volumen del cono del bebedero por la contracción de la pieza, bajo la siguiente propuesta a la tapa del molde, misma que dará servicio a todos los modelos del molde progresivo, mostrado en la Figura 5 y 6.

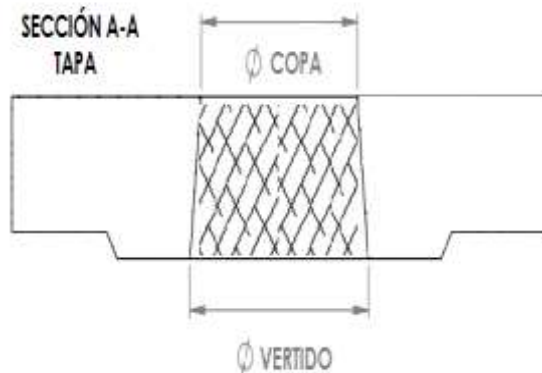


Figura 5. Disposición de copa y bebedero de vertido para el molde.

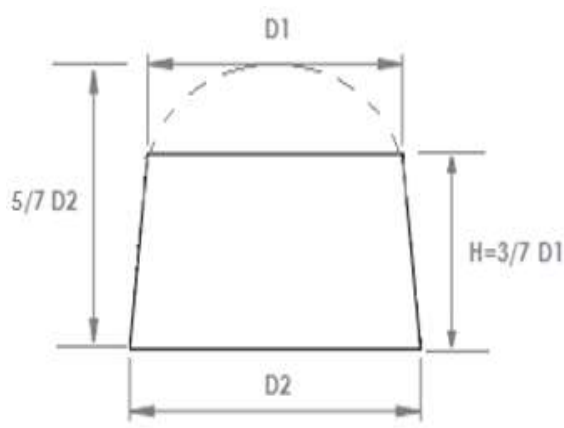


Figura 6. Proporcionalidad del cubo/bebedero de vertido para el molde.

La sobre utilización de la Figura 6 tuvo la finalidad en el positivo, de formar parte mecánica de la pieza y en el negativo, como la copa del bebedero de vaciado o cono de vertido para llenar el molde y su respectivo ángulo de salida para el desmolde. La angulación de basa entre 5-15 mm (1/16 a 3/16 in/pie) o de 0.5° a 2°, en las superficies internas, suelen duplicarse a las antes mencionadas, derivado de la dirección interna de contracción del metal fundido (9). El resultado del módulo de enfriamiento, indica el tiempo porcentual adicional, que tarda en enfriar el cubo del bebedero a comparación de la pieza, su cálculo permitió dimensionar dicho cubo como se muestra en la Figura 7.

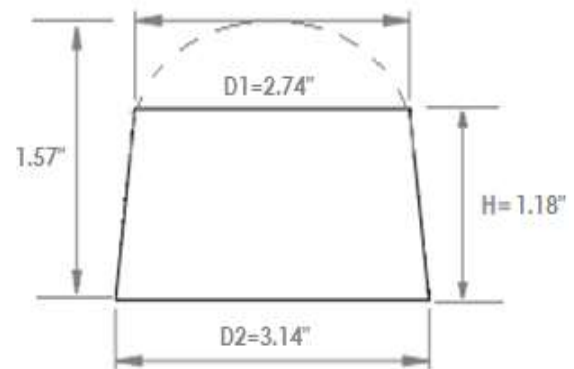





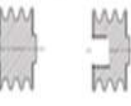


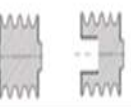

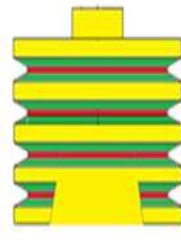


Figura 7. Dimensionado del cubo/bebedero para el molde.

3.3.4 Análisis de ángulos de desmoldeo

Los ángulos de salida, son esenciales para facilitar la extracción de la pieza fundida (15, 9), para el presente caso de estudio se seleccionó un análisis considerado para secciones, mostrado en la Tabla 3: en color verde; ranuras, con ángulo de desmoldeo de 20°, teniendo el área de mayor velocidad de enfriamiento. En color amarillo; paredes, con ángulos rectos coincidentes con la línea de partición del molde y en color rojo; áreas de mayor concentración de calor y menor enfriamiento.


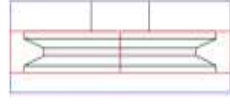
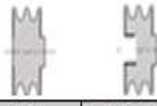
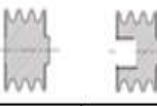
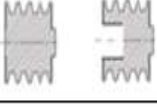
Tabla 3. Impacto de los ángulos de desmoldeo en el proceso de enfriamiento.

| Modelo 154.2 mm | | Análisis de los ángulos de desmoldeo por zonas de enfriamiento | |
|--|-----|---|---|
| 1RA | 1RB | | |
| Maciza tipo P  | |  | |
| 2RA | 2RB | | |
| Maciza tipo P y P/C  | |  |  |
| 3RA | 3RB | | |
| Maciza tipo P y P/C  | |  |  |
| 4RA | 4RB | | |
| Maciza tipo P y P/C  | |  |  |

3.3.5 Cálculo de la línea de partición

Jami (30), realizó un estudio para determinar el análisis de ángulos de salida, convenientes para un sistema de alimentación múltiple. Por ello se desarrolló para este molde, una forma conjunta de desmoldeo, fundamentado en la geometría del dispositivo mecánico de tracción, evidenciando el plano de partición conveniente, que coadyuve al progresivo escalamiento y compatibilidad de los componentes del molde, para cada modelo y arquetipo, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Líneas de partición del molde para ensamble y apertura.

| Modelo 154.2 mm | | Planos de partición el molde multiparametrizable |
|---|-----|---|
| 1RA | 1RB | |
| P  | |  |
| 2RA | 2RB | |
| P y P/C  | | |
| 3RA | 3RB | |
| P y P/C  | | |
| 4RA | 4RB | |
| P y P/C  | | |

Denotado por colores que indican los ejes de acción de la línea de partición: en azul, las partes del molde de ensamble-apertura vertical (base, inserto y tapa), con inclusión por concordancia de huella a los componentes adyacentes y en rojo, las partes del molde de ensamble-apertura horizontal (cuerpos ranurados). Su permanencia se deberá a un juego accesorio de perno y bisagras, que permitirá la intercambiabilidad de componentes y sujeción durante el proceso de vaciado del metal líquido. El área roja indica: las zonas de contacto, en dirección a la apertura para la extracción del dispositivo, durante la fundición y conformación.










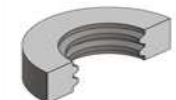

3.3.6 Diseño CAD 2D y 3D de los componentes del molde

El desarrollo del positivo gobernó las verificaciones por unidad, de lo que preexistiría en el negativo del molde, para ello fue necesario realizar el cotejo entre el diseño paramétrico (cada uno de los componentes positivos de los dispositivos mecánicos de tracción) y el diseño variacional de los elementos del sistema. Puesto que la mayoría de las consideraciones paramétricas, tienen la finalidad de que, al ser conocidas, sea posible el manejo de las formas, dimensiones y tolerancias en fases bipartidas desde el CAD (28), como es el caso del presente desarrollo, en el que se verificaron los espacios simbolizados no paramétricamente, elipses y

figuras geométricas simples, mallas poligonales, arreglos en áreas de revolución paramétrica, planos de barrido y subdivisiones.

Ahora bien, las geometrías progresivas para el molde completo, consideraron en su desarrollo las dimensiones del CAD que anteriormente se enunciaron en la Figura 1, para cada uno de los 7 dispositivos modelados con y sin arquetipo, con especial detalle en el dimensionado de los componentes del prototipo geométrico del molde: espesores de base y cubierta, paredes, ranuras, insertos y guías, mostrados en la Tabla 5, aplicables y coincidentes en cada uno de los modelos de la Tabla 2. Los accesorios diseñados serán incluidos en la fase operativa.

Tabla 5. Componentes diseñados del sistema que conformara el molde.

| Componente | 3D | Componente | 3D | Componente | 3D |
|------------------------------|---|---|---|-------------------------|---|
| Tapa cónica |  | Cuerpo ranurado 2R-derecha |  | Base de rayos |  |
| Cuerpo ranurado 1R-derecha |  | Base porta molde |  | Bisagras guía de cierre |  |
| Cuerpo ranurado 1R-izquierda |  | Inserto Perno para el inserto y la base |  | Pestañas de apertura |  |
| Cuerpo ranurado 2R-izquierda |  | Tapa de rayos |  | | |

3.3.7 Diseño de ensambles progresivos en el molde

En la Tabla 6, se muestran las simulaciones de ensambles progresivos de los modelos objetivo, que formaron la huella negativa interna en el molde, con ello el

reconocimiento, despiece y secuencia de montaje.

Se integraron y expusieron las geometrías que entran en concordancia progresiva, por medio de la compatibilidad e intercambiabilidad, esto permitió escalar el modelo por medio de arquetipos y cavidades.

Adicionalmente se muestran los componentes opcionales, con la finalidad de verificar el ensamble, corroborar el escalable de forma

digital, así como las áreas libres de contacto, permitiendo realizar los ajustes necesarios de coincidencia.

Tabla 6. Ensamble progresivo y algoritmo grafico del molde.

| Modelo-Arquetipo | Ensamble progresivo | Componentes compatibles | Componentes intercambiables | Componentes opcionales |
|------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 1RA-B | | | | |
| 2RA-B | | | | |
| 3RA-B | | | | |
| 4RA-B | | | | |

3.4 Comprobación experimental del diseño

La fase experimental que permitió exportar el diseño del molde progresivo a la fase permanente, se basó en una concepción geométrica funcional (21), fundamentada en un diseño prototipado como plataforma, donde la parte geométrica fue fiable y coincidente, guiando a la fabricación de un molde permanente por fundición, que fue corroborado bajo un algoritmo de acoplamiento. Por ello las partes diseñadas en el CAD y prototipadas rumbo a la fase de manufactura permanente, siguieron un método específico de elaboración, mostrado en la Figura 1, este se llevó a cabo dentro de la empresa y se detalla a continuación.

3.4.1 Moldeo

En este paso del proceso de manufactura, se llevaron a taller de moldeo las piezas prototipadas, con la finalidad de lograr moldes

desechables con las formas de cada una de las partes. El moldeo permite casi cualquier metal fundido, de él se obtienen superficies en el tamaño, forma o peso de la parte, relativamente grueso y tolerancias amplias con bajo costo del herramental (3). Los moldes de contención de las piezas se muestran en la Figura 8.



Figura 8. Moldeo de las piezas del molde próximas a fundición.

3.4.2 Fundición

El acero H13 seleccionado para la fabricación de las piezas para conformar el molde permanente, fue vertido después de su fundición en cada uno de los moldes de las piezas moldeadas, obteniendo los elementos prototipados ahora en permanentes.

El método constó de una fundición en horno eléctrico + refundición por electroescoria, para reducir el contenido de elementos nocivos como el oxígeno, el hidrógeno y las inclusiones en el material, para conservar la tenacidad del acero (32). El acero fundido en el horno eléctrico, pasó por el principio ESR (refundición de electroescoria): electrodo consumible que forma un circuito de red corta con la escoria y un depósito de agua, donde viajó la corriente desde un transformador a través de la escoria líquida. Ventajosamente la escoria presentó una elevada resistencia ante el suministro de energía, generando gran cantidad de calor en el baño de escoria, provocando un fundido de alta temperatura, provocando gradualmente que el extremo del electrodo consumible sea derretido.

Concluida la fundición, por efecto de la gravedad, se extrajo y vació el metal líquido en los moldes previamente preparados. El proceso antes mencionado logró eficazmente la limpieza y la uniformidad de la microestructura del acero H13. El proceso representó un equiparable contenido de S y P ($\leq 0.003\%$ S, $\leq 0.015\%$ P), mayor homogeneidad y una estructura excepcionalmente fina.

En total se obtuvieron 11 piezas en reproducción de los modelos de prototipado, con un peso total de 105 kg, como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Piezas extraídas de los moldes después de la fundición.

3.4.3 Tratamiento térmico

La importancia del tratamiento térmico a aceros comunes y al carbono (33), se realizó para agregar un alto valor a las piezas producidas de forma simultánea, propiciando cambios significativos en las condiciones estructurales del material, por efecto del control de la temperatura y la sensibilidad de las condiciones de tratamiento empleado. Las pruebas de dureza para H13 no podían considerarse condición suficiente para un tratamiento térmico de calidad, por ello fue necesario garantizar un tratamiento térmico característico. La influencia del tratamiento en la microestructura y maquinabilidad del acero, proveniente del proceso propio, conocido como (AR) y seguido de un templado simple (QST), donde se mantuvieron constantes las variables metalúrgicas: tiempos y tasas de enfriamiento al aire. Evaluándose el tratamiento térmico del acero, por medio de la estabilidad del proceso con controles de dureza y tenacidad, con los resultados que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Respuesta al tratamiento de las piezas fundidas en acero H13.

| Dureza y tenacidad al impacto | | | |
|--------------------------------------|-------|------------------|--------|
| Temple a 1010°C Enfriamiento al aire | | | |
| Temperatura de revenido | HCR | Entalla Charpy C | |
| | | Ft. Lbs. | Joules |
| 540°C | 51-53 | 10 | 14 |
| 560°C | 49-51 | 10 | 14 |
| 595°C | 46-48 | 18 | 24 |
| 605°C | 40-42 | 8 | 24 |
| 620°C | 35-37 | - | - |
| 650°C | 28-32 | - | - |

Concluido el proceso se procedió al retiro de copas de vaciado y bebederos, posteriormente se eliminaron los residuos excedentes por medio de un ciclo de 15 minutos de shoot blast, obteniendo un mejor acabado previo al maquinado.

3.4.4 Maquinado

Las piezas fundidas en acero H13 alcanzaron una maquinabilidad y rectificabilidad en estado recocido de aproximadamente un 70% referido a un acero de tipo W1 (1%C), lo anterior en concordancia con Mesquita y Martínez (33; 34). Por medio del maquinado de las piezas redondas, rectas, cónicas, curvadas o ranuradas, se logró un ajuste en las tolerancias dimensionales características, milimétricas de +/-: finas de 0.025–0.13 y basto: 0.13. En la Figura 10 se resumen las operaciones realizadas a los componentes. El proceso se apegó al diseño CAD y a las hojas de procesos, bajo las siguientes actividades y resultados de manufactura rápida (RM), mostrados en la Figura 10.




| | | | | |
|------------------|-----------|---|---|--|
| Maquinado | Torneado | Ajuste de dimensional de superficies y ranuras |  |  |
| | Barrenado | Dimensionado de barrenos y accesorios de sujeción | | |
| | Soldadura | Soldado de bisagras y pestañas de apertura |  | |

Figura 10. Operaciones de maquinado a las piezas del molde.

4. Discusión de resultados

Se compararon las piezas diseñadas, prototipadas, fundidas y maquinadas para

evidenciar el grado de coincidencia geométrica, como se ejemplifica y demuestra en la Figura 11.



Figura 11. Coincidencia de los elementos maquinados.

Procediendo a equiparar la coincidencia entre el diseño del positivo, prototipo y piezas maquinadas de los elementos del molde, para que estos últimos siguieran el algoritmo de ensamble futuro.

De lo anterior se pudo observar la siguiente relación mostrada en la Figura 12, en la que se evidenció que la complejidad de diseño, radicó en las partes de cuerpos ranurados en todos sus arquetipos, la base y tapa de rayos, a diferencia de las partes externas como base y tapa.

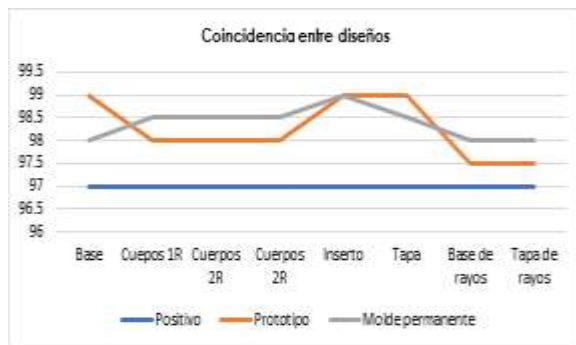


Figura 12. Relación coincidente entre las fases de diseño.

La demostración dentro los parámetros de diseño, resultó con el mínimo de coincidencia del 97% que se calculó en el positivo, esto derivado de la tolerancia requerida del $\pm 3\%$ (el positivo porcentual, indica el índice de expansión del prototipo al moldeo/fundición y el negativo porcentual, indica el índice de reducción del material por efecto del maquinado), definida en la fase fabricación funcional. Adicionalmente, se estimó $\pm 1\%$ como margen de error con respecto a la coincidencia, obtenida como de ajuste del maquinado a la pieza positiva, extraída del molde durante una futura fase de fundición y manufactura, como se muestra en la Figura 13.

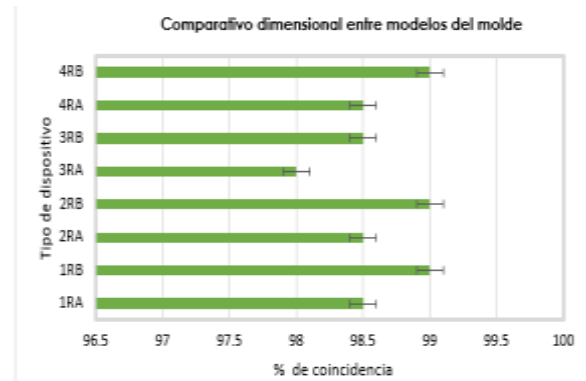


Figura 13. Relación coincidente entre el positivo y el molde.

Se realizó una prueba de compatibilidad, que evidenció en los cuerpos ranurados y la base/tapa, un juego de coexistencia, es decir, que tuvieran un ensamble total, ya que estas piezas garantizarán la funcionalidad del molde, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Elementos compatibles dentro y fuera del ensamble.

La importancia de la compatibilidad entre los componentes impacta directamente en los ensambles del algoritmo, en el modelo y arquetipo, ya que al coincidir al 98% algunos de ellos, auguran en el complemento del ensamble su funcional desempeño en el futuro proceso en línea de manufactura. Lo anterior, muestra la diferencia entre moldes que generan regiones automáticas de varias piezas (12) y moldes para probetas (16), o poleas (19). En la Figura 15 se midió la relación

porcentual entre componentes con el resto del ensamble.

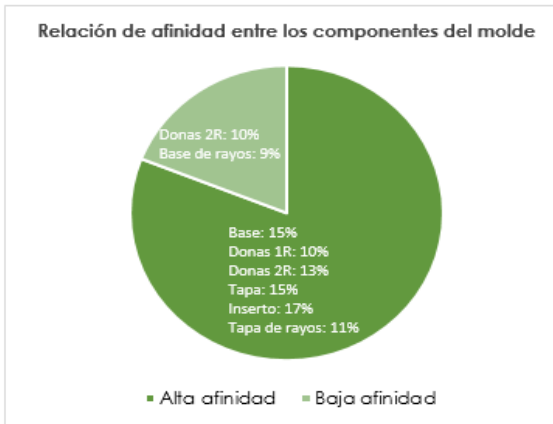


Figura 15. Elementos del molde de mayor afinidad.

Lo anterior muestra que la base, la tapa cónica y la tapa de rayos, son los elementos de mayor afinidad al resto de los componentes. Los cuerpos ranurados 2R son componentes que debido a su intercambiabilidad y elevada afinidad se diferencian de los demás componentes. Sin embargo, los elementos que hacen dependiente el ensamble son: cuerpos ranurados en todas sus modelos y base-tapa de rayos. El resto pueden conformar el ensamble sin necesidad de depender de un complemento. Los puntos que se definieron con anterioridad, permitieron confrontar el molde progresivo con los moldes convencionales que fuesen equivalentes a este, comportándose como se muestra en la siguiente Figura 16.

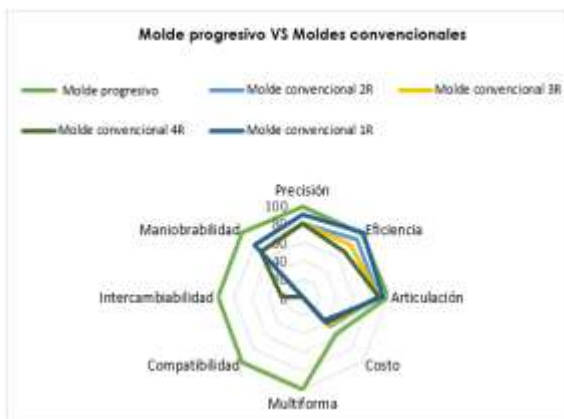


Figura 16. Comparativo de factores por tipo de molde.



Figura 17. Alcance de los resultados por fase y factor de motivación.

Una vez medidos los resultados de la fabricación, se relacionaron los factores involucrados en el presente estudio, mostrando: el alcance, la concordancia y el impacto que entre ellos existió, como se mostró en la comparativa de la figura 17.

5. Conclusiones

El diseño de un molde progresivo en este estudio, fue realizado para una empresa fabricante de dispositivos mecánicos de tracción, lo cual aportó una iniciativa, que permite integrar modelos matriciales de máxima utilización sobre los moldes y matrices actuales, ya que estos últimos mencionados, solo permiten obtener un modelo por unidad, no son flexibles ni adaptables. El análisis y diseño del molde, permitió una aproximación matemática, donde los parámetros fueron accesibles a la manipulación por atributo mediante el CAD. Los diseños del positivo y negativo del molde, integraron las variables de forma óptima y permitieron realizar múltiples pruebas, reediciones y simulaciones de bajo costo, coincidiendo con los algoritmos de configuración para el futuro ensamble y la progresión del mismo. La fabricación fue tangible en sus componentes, permitió concretar el análisis del requerimiento precisado en el modelo y la relación

tipológico-arquetipo desarrollado durante el CAD, mostró la efectividad del positivo y los efectos progresivos en el negativo del molde. La fundición del material permitió la transformación rápida del acero a la forma aproximada a lo deseado entre un 95-97%. El proceso complementario a la fundición fue un coadyuvante a las propiedades esperadas en el molde. Los resultados de maquinado corroboraron las geometrías diseñadas durante la fase CAD de forma progresiva para varias piezas diferentes a obtenerse por configuraciones algorítmicas del molde, a diferencia de moldes de varias piezas separadas en el negativo (Lin & Quang, 2014). Por lo que el molde en una fase operativa permitirá; aportar atributos y variables al modelo de manufactura rápida y diversificar la tipificación de dispositivos de tracción. La fabricación de estos diseños de moldes progresivos, incorporados a futuro, en las líneas de fabricación de las empresas manufactureras, permitirá lograr; formas únicas transformables, adaptables y reutilizables para un elevado número de piezas que conformen una familia determinada, reduciendo los elevados costos de fabricación de moldes individuales. El proyecto del molde progresivo, se insertó a las secuencias operativas de producción, mismas que medirán su comportamiento a corto, mediano y largo plazo. Imperante es pautar este desarrollo como base de progresión múltiple en la fabricación de moldes.

6. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por Exfyma.

Al CONACYT por la beca otorgada para el estudio del posgrado de Doctorado en Manufactura Avanzada de la modalidad posgrado con la industria.

Al CIATEQ A.C., por el apoyo para el desarrollo de este proyecto.

7. Rerefencias

- (1) Alam, M. R., Amin, M. A., & Karim, M. A. (2018). A computer-aided mold design for transfer molding process in semiconductor packaging industry. *Procedia Manufacturing*, 21, 733–740.
- (2) Alan C. Lin, Nguyen Huu Quang. (2014). Automatic generation of mold-piece regions and parting curves for complex CAD models in multi-piece mold design, *Computer-Aided Design*, 57, 15-28.
- (3) Groover, M. P. (2016). *Groover's principles of modern manufacturing SI version, global edition*. John Wiley & Sons.
- (4) Ramos, Serafín. (2019). *Manufactura de moldes*. Metalmecánica Internacional. Axioma B2B Marketing. México. Edición 2, Vol. 24. Pág. 12-17.
- (5) Franke, S. (2019). *Manual de Fundición*. Alemania: Giesserei Praxis.
- (6) Varun, S., & Chavan, T. K. (2021). Influence of mould vibration on microstructural behaviour and mechanical properties of LM25 aluminium alloy using gravity die casting process. *Materials Today: Proceedings*, 46, 4412–4418.
- (7) Hall, J. (s/f). *PRINCIPIOS COLADA POR GRAVEDAD (GDC) UTILIZANDO BASCULACIÓN REVERSA*. Cmhmfg.com. Recuperado el 18 de agosto de 2020, de https://cmhmfg.com/pdf/CMH%20SS_2019_S_SP.pdf
- (8) López, M., Gómez G., Sánchez S. (2019). *Tecnología de la Fabricación, Apuntes de Teoría*, Editorial Universidad de Alemania.

- (9) Nekrutov, V. G., Irshin, A. V., & Reshetnikov, B. A. (2020). Improvement of equipment for knocking out castings from molds. En *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 269–276). Springer International Publishing.
- (10) Contreras B. L. E, Vargas T. L. F; Ríos, L. R. A, (2018); Procesos de fabricación en metales, Bogotá, Colombia, Ediciones de la U.
- (11) Gianfranco de M. S., Soares, D, Oliveira, P. (2021). Interfacial Heat Transfer Coefficient in Unidirectional Permanent Mold Casting: Modeling and Inverse Estimation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 166, p 170-207.
- (12) Lin, A., & Quang, N. (2014). Automatic generation of mold-piece regions and parting curves for complex CAD models in multi-piece mold design. *Computer Aided Design*, 57, 15–28.
- (13) Happold, H., Feiler, K., Reinhard. (2020). Tecnología de los metales, Editorial Reverté S.A., Edición digital, Barcelona, España.
- (14) Bopla. s(f). *Tolerancias para piezas de fundición de aluminio*. Recuperado el 13 de enero de 2021, de <https://www.bopla.de/es/datos-tecnicos/informaciones-tecnicas/informaciones-sobre-el-material-aluminio/informacion-general-sobre-cajas-de-aluminio/tolerancias-para-piezas-de-fundicion-de-aluminio.html>
- (15) Pinto, H. A., Silva, F. J. G., Martinho, R. P., Campilho, R. D. S. G., & Pinto, A. G. (2019). Improvement and validation of Zamak die casting moulds. *Procedia Manufacturing*, 38, 1547–1557.
- (16) Gómez, B., Valencia, A., Ortiz, D. (2018). Construcción molde permanente para probetas de aleaciones de aluminio aplicando la norma ASTM-108. *Revista UIS. Universidad Industrial de Santander*.
- (17) Ulrich, K.T., Eppinger, S. D., Yang, M. C. (2019). *Product Design and Development*. 7a edition. McGraw Hill, p 285-298, México. ISBN-10: 1260566439, ISBN-13: 978-1260566437.
- (18) Patiño, D., Hernán, D., López, P., & Mosquera, A. (2017). Metodología del diseño y modelado de un accionamiento mecánico. *Scientia Et Technica*, 221(1), 24-33.
- (19) Almeida, J., Pilicita, C. (2017). Análisis del proceso de producción en la fabricación de poleas de aluminio en la empresa Tecnipolea y su incidencia en la producción. Universidad Tecnológica Indoamérica.
- (20) Timelli, E. G. Butler, W.A., Battaglia, Bonollo, F. (2016). Die Catsing (Permanent Mold), Reference Module in Materials Engineering, Elsevier.
- (21) Cano, F.M.A., Pérez, B. R. (2020). Prototipado de molde multiparametrizable para manufactura rápida. *Revista Nthe*, Edición especial, septiembre-diciembre de 2020: pp. 37-48.
- (22) Muñoz, R. (2015). Metodología de la Investigación, Oxford Universitu Press. México.
- (23) Kalpakjian, S. (2014). "Manufactura, ingeniería y tecnología: tecnología de materiales", (7a. ed., 1a. reimp.). Pearson Educación.
- (24) Neges M., Adwernat S., Wolf M., Abramovici M. (2019) 3D Geometry Recognition for a PMI-Based Mixed

- Reality Assistant System in Prototype Construction. In: Burduk A., Chlebus E., Nowakowski T., Tubis A. (eds) *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance*. ISPEM 2018. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 835.
- (25) Arkhipov M.V., Matrosova V.V., Volnov I.N. (2020) Automation in Foundry Industry: Modern Information and Cyber-Physical Systems. In: Radionov A., Karandaev A. (eds) *Advances in Automation*. RusAutoCon 2019.
- (26) Demir, H., Gündüz, S., & Erden, M. A. (2018). Influence of the heat treatment on the microstructure and machinability of AISI H13 hot work tool steel. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 95(5–8), 2951–2958.
- (27) Marcos, C. (2015, 2 octubre). *Forma abierta y diseño parametrizado. Un nuevo modo de proyectar*. Recuperado 16 de abril de 2019, de https://www.researchgate.net/profile/Carlos-L-Marcos/publication/282367312_FORMA_ABIERTA_Y_DISENO_PARAMETRIZADO_UN_NUEVO_MODO_DE_PROYECTAR/links/560f071708aec422d112dee2/FORMA-ABIERTA-Y-DISENO-PARAMETRIZADO-UN-NUEVO-MODO-DE-PROYECTAR.pdf.
- (28) Klochkvov, Y. V., Nikoleav, A.P. & Kiselyova, T.A. (2017). To the question on continuous parameterization of spatial figures having an ellipse in a section. *Russ Math.* 61, 27-31.
- (29) Askeland, D. R. (2016). *La ciencia e ingeniería de los materiales* (7a. ed.). México: International Thomson Editores.
- (30) Jami, M. D. (s.f.). *Mención Fabricación de Autopartes del Vehículo*. Recuperado 17 de octubre de 2019, de <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2793/1/DISE%C3%91O%20Y%20CONSTRUCCION%20DE%20UN%20MOLDE%20PERMANENTE%20PARA%20FABRICACION%20DE%20BATERIAS%20AUTOMOTRICES.pdf>.
- (31) American Society for Testing and Materials. (2019). B108/B108M-19: Especificación estándar para piezas de fundición de moldes permanentes de aleación de aluminio. Recuperado el 19 de abril de 2020 de: <https://www.astm.org/>
- (32) Lkalloy, K., 2021. Ventajas del acero para herramientas H13 fabricado por el proceso ESR. España.
- (33) Agnelli-Mesquita, R., Moraes, P. (2012). Tratamiento térmico de moldes e matrices e os aspectos de qualidade relevantes. *Exacta*; 10(3):357-370. [fecha de consulta 6 de febrero de 2021]. ISSN: 1678-5428. Disponible en: <https://www.redalcy.org/articulo.oa?id=810/81024949006>
- (34) Martínez, F. y Sánchez Battaille, T. (2007). Conceptos del maquinado con altas velocidades de corte aplicado en moldes y matrices. *Ingeniería Mecánica*;10(1):63-69. Recuperado el 6 de febrero de 2021, de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=251/225117649009>