Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Optimización del proceso de fabricación de piezas fundidas en molde múltiple permanente bajo gravedad

Optimization of the manufacturing process of castings in permanent multiple gravity molds

Boche-Cano, E.Y.[a], Cano-Figueroa, M.A.[b]*, Arcos-Gutiérrez, H.[b], Garduño, I.E.[b]

[a] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Ciudad Sahagún-Otumba s/n, Zona Industrial, 43990 Cd. Sahagún, Hgo.
[b] CIATEQ A.C., Unidad San Luis Potosí, Eje 126 No. 225. Zona Industrial. San Luis Potosí, S.L.P., C.P. 7839 Unidad S.L.P., México.
edgarbochecano@gmail.com; martha.cano@ciateq.mx*; hugo.arcos@ciateq.mx; isaias.garduno@ciateq.mx

Innovación Tecnológica: Mejora y configuración única en la fabricación con molde múltiple para fabricar piezas de fundición.
Área de aplicación Industrial: Desarrollo y mejora de los procesos de fabricación.

Recibido: 06 diciembre 2024
Aceptado: 29 enero 2025

Abstract

Nowadays, the manufacturing processes of castings in permanent molds require designs with total geometric coincidence with the cast and shaped product to be obtained. By carrying out work studies on the various ways of designing castings and finished parts, it is possible to identify the improvements required in the process. Typically, the actions can be functional as long as the working conditions and techniques are not affected by variables that require attention, such as a change in product design or incompatible materials. Molds for the production of castings are essential for their shaping, whether or not they guarantee or compromise the continuous production of a product. The improvements that they undergo are based on the requirements of the product and the working methods within the manufacturing process. The aim is always to ensure the viability of the costly manufacture, implementation, rehabilitation or maintenance of a mould. Unit moulds correspond to a defined geometry per product, so if you have a large product portfolio, you will need the same number of moulds with tasks and relative similarities in manoeuvrability. Having moulds with greater geometric functionality or new designs means adopting new ways of working. The objective of this research was to implement a permanent multiple mould under

gravity with a negative parametrizable configuration for 6" diameter parts with 1 to 4 trapezoidal A and B slots, cast in aluminium, in a micro-manufacturing company, to optimise work tasks and techniques, maximizing the productivity of different parts and improving a manufacturing process. In addition, the aim was to encourage the transition to new forms of mass production in moulds and their correct use, as well as the introduction of innovative and diversified multiple moulds within the pilot production lines. The above was achieved analytically, physically and experimentally, in the line process, with the mould and its implementation. Initially, studies and projections were carried out within the process using PAT (Process Analytical Technology), the standardised study of methods study MTM (Methods Time Measurement) time, as well as the assisted design of the process area lay-out CAD (Computer Aided Layout Design). The multi-mould was evaluated using a generalised non-destructive testing (NDT) method, followed by algorithm and mechanical configuration identification, process validation matrix, tooling enablement techniques and work method testing. Finally, it was integrated with the implementation on the manufacturing line, where functional, manoeuvrability and type repeatability validation tests were performed. The results showed that 97% overall assembly efficiency was achieved, with 96% and 98% accuracy and manoeuvrability, respectively. Advanced training trained and improved the technique of the line operators, which favoured the interchangeability of the mould available, impacting on the parameters of fidelity, concurrency and the production of 22 different parts from a single mould, foreseeing to reach 26 parts, as opposed to conventional ones, which to produce 22 different parts require the same number of moulds. The initial assessment of the mould manufacturing cost increased by 25% compared to a conventional mould, but was reduced by 88% overall, taking into account the sum of all the costs per conventional unit required to manufacture a single multiple arrangement, making the scalability of the manufacturing process to multiple moulds feasible and perfecting the ways of forming castings under gravity.

Keywords: Manufacturing processes, Gravity die casting, Multiple molds.

Resumen

Actualmente, los procesos de fabricación de piezas fundidas en moldes permanentes requieren diseños con total coincidencia geométrica con el producto fundido y conformado que se desea obtener. La realización de estudios de trabajo para las diversas formas de concepción de piezas fundidas y manufacturadas permite identificar las mejoras que requiere el proceso. Habitualmente, las acciones pueden ser funcionales, siempre y cuando las condiciones y técnicas de trabajo no se vean afectadas por variables que requieran atención, como un cambio en el diseño del producto o materiales no compatibles. Los moldes para la fabricación de piezas fundidas son esenciales para su conformación; contar o no con ellos garantiza o compromete la producción continua de un producto. Las mejoras que sufren estos se deben a la exigencia del producto y de los métodos de trabajo dentro del proceso de fabricación. Siempre se busca garantizar la viabilidad de una costosa fabricación, implementación, rehabilitación o preservación de un molde. Los moldes unitarios equivalen a una geometría definida por producto, por lo que, si se cuenta con un amplio catálogo

de productos, se necesitará el mismo número de moldes, con tareas y similitudes relativas de maniobrabilidad. Contar con moldes de mayor funcionalidad geométrica o con nuevos diseños implica adoptar nuevas formas de trabajo. El objetivo de la presente investigación fue implementar un molde permanente múltiple bajo gravedad, de configuración parametrizable negativa de piezas de 6 pulgadas de diámetro, de 1 a 4 ranuras trapezoidal A y B, fundidas en aluminio en una microempresa manufacturera, optimizando las tareas y técnicas de trabajo, maximizando la productividad de piezas diversas y perfeccionar un proceso de fabricación. Adicionalmente, la finalidad fue propiciar la migración a nuevas formas de fabricación masiva en molde y su correcta utilización, así como la inserción de moldes múltiples innovadores y diversificados dentro de las líneas de producción piloto. Lo expuesto anteriormente se logró de forma analítica, física y experimental, en el proceso de línea, con el molde y su implementación. Inicialmente, dentro del proceso se realizaron estudios y proyecciones mediante la tecnología analítica de proceso PAT (Process Analytical Technology), el estudio estandarizado de métodos y el tiempo MTM (Methods Time Measurement), así como del diseño asistido de lay-out del área de proceso (CAD). El molde múltiple se evaluó mediante un método de prueba no destructiva y generalizada (NDT, por sus siglas en inglés), para proseguir con la identificación del algoritmo y la configuración mecánica, la matriz de validación del proceso, las técnicas de habilitación de herramental y la prueba del método de trabajo. Finalmente, se integró con la implementación en línea de fabricación, donde se realizaron las pruebas funcionales, de maniobrabilidad y de validación de repetibilidad por tipo. Los resultados obtenidos demostraron que se alcanzó un 97% de eficiencia global de ensamblaje, con una precisión y maniobrabilidad del 96 y el 98 %, respectivamente. La instrucción anticipada capacitó y mejoró la técnica de los operarios de línea, lo que favoreció la intercambiabilidad disponible del molde, impactando en parámetros de fidelidad, concurrencia y producción de 22 piezas diferentes a partir de un solo molde, previendo alcanzar las 26 piezas, a diferencia de los convencionales, que para fabricar 22 diferentes piezas requieren igual número de moldes. La evaluación inicial del coste de fabricación del molde aumentó en un 25% con respecto a un molde convencional, pero se redujo en un 88% en términos generales, teniendo en cuenta la suma de todos los costes por unidad convencional necesarios para fabricar un solo arreglo múltiple, lo que hace factible la escalabilidad del proceso de fabricación a moldes múltiples y perfecciona las formas de conformación de piezas fundidas bajo gravedad.

Palabras clave: Procesos de fabricación, Fundición en moldes permanentes, Moldes múltiples.

1. Introducción

Desde tiempos antiguos, la fundición representa una técnica muy versátil para la creación de piezas complejas, con beneficios como menores costes, alta productividad y compatibilidad con el reciclaje, ajustándose a modelos de optimización productiva a gran escala (Munari et al., 2023). Los avances tecnológicos en la fundición han mejorado significativamente las características de las piezas obtenidas, haciéndolas competitivas frente a otras técnicas como las de conformado, por lo que se recomienda su combinación para obtener mejores resultados (Casting Aluminum Alloys, 2022; Wu, 2021). Contar con insumos de calidad, moldes,

métodos de fabricación, procesos de maquinado y acabado, pueden garantizar piezas de aluminio funcionales. Pese a los beneficios, también pueden presentar desafíos, como materiales fuera de especificación, moldes insuficientes o bajo control del método de fabricación, esto comprometiendo las fundiciones de aluminio de alta calidad. Por eso, la mejora de los componentes, las etapas y los elementos involucrados puede sustentar el ciclo de fabricación y, por ende, la calidad del producto (López, 2016). Por lo tanto, realizar un análisis detallado del proceso de fabricación permite implementar acciones correctivas para maximizar la eficiencia y la rentabilidad, e identificar factores críticos que puedan comprometer el conformado, la continuidad de la producción, el uso de materiales incompatibles o cambios inesperados en el diseño del producto (Flores y Núñez, 2022).

Alrededor del 30% de los productos de aluminio se fabrican mediante este proceso, siendo la elección preferida para piezas con diseños elaborados (Casting Aluminum Alloys, 2022). Como consecuencia del proceso de conformación, las piezas de aluminio fundido y sus diversas aleaciones de acuerdo a los requerimientos del cliente, ofrecen una buena resistencia mecánica, una excelente protección contra la corrosión, una conductividad térmica y eléctrica sobresaliente y un coste asequible (Edwin et al., 2020). Sin embargo, a pesar de sus ventajas, las propiedades de las piezas fundidas no siempre se comparan o igualan a las obtenidas por forja (Bush et al., 2020). El uso de moldes permanentes ha representado una gran alternativa productiva que permite su continua utilización en la industria manufacturera, especialmente cuando se requiere precisión dimensional y calidad constante en los componentes (Sigworth, 2018). Algunas características de estos moldes permanentes son su suficiente deformabilidad, huellas detalladas, alta resistencia y dimensionamiento estable, lo que permite una fabricación rápida y masiva. Su uso permite fabricar piezas con formas complejas y propiedades mecánicas adecuadas para diversas piezas industriales (Cano-Figueroa et al., 2020).

A diferencia de los moldes de arena verde, los moldes permanentes son reutilizables y están diseñados para resistir las altas temperaturas y presiones involucradas en la fundición (Ramos, 2019). Por ello, deben coincidir exactamente con las especificaciones geométricas del producto final, ya que cualquier desviación puede afectar a su funcionalidad y calidad (Lampman, 2018). La producción continua de piezas mediante moldes permanentes depende de la disponibilidad y el estado óptimo de estos moldes, por lo que es esencial que sean duraderos y de alta calidad para asegurar una fabricación eficiente y minimizar tiempos de inactividad. Sin embargo, su mantenimiento y actualización requieren una inversión constante, ya que deben adaptarse a las demandas del mercado y a las nuevas tecnologías (Carrera, 2021).

Además, en procesos que requieren la fabricación de múltiples productos con geometrías específicas, es necesario contar con moldes individuales para cada pieza que se desea manufacturar, lo que incrementa los costos asociados a su diseño, fabricación, almacenamiento y conservación (Cano-Figueroa et al., 2020).

Con el objetivo de mejorar este proceso, en el presente trabajo se ha implementado un molde permanente múltiple de Cano-Figueroa y Pérez-Bustamante (2022), con un diseño algorítmico negativo para conformar piezas de aluminio de especificación a solicitud del cliente, no se cuenta con un aluminio específico de trabajo, este no sufre otros procesos previos ni posteriores a la colada bajo gravedad. Este molde es la innovación dentro

del proceso, ya que con un solo molde se logran producir diversas piezas en dimensión de 6 pulgadas con todas las especificaciones disponibles en catálogo o de línea, y que convencionalmente se fabricaban con igual número de moldes de nula adaptabilidad. Esto favorece su condición funcional con respecto a los moldes ordinarios, propiciando la migración hacia procesos de producción flexible y masiva. Los nuevos moldes múltiples, al tener configuraciones adaptables, permiten alcanzar y cumplir las demandas del mercado, en cuanto a variables de diseño como; número y tipos de ranura, presentación estructural e inclusive opciones que no pudieran estar consideradas en el requerimiento original y que favorezcan funcionalmente la pieza, sin comprometer el arreglo original, por lo que reduce los costes y simplifica las operaciones en las líneas de fabricación (Cano-Figueroa & Pérez-Bustamante, 2022).

Por este motivo, en esta implementación se consideró importante realizar estudios de trabajo que observaran el desarrollo desde la etapa de diseño y producción de piezas, puesto que esto implica detectar oportunidades de mejora en los procesos de fabricación (Lago, 2015). Estas mejoras pueden implicar modificaciones en los diseños de los moldes, optimización de las técnicas de fundición o ajustes en las condiciones de operación (Zemborain Martínez-Pita, 2024).

Para materializar esta innovación, se integraron métodos analíticos, físicos y experimentales. Se realizaron estudios preliminares del proceso utilizando tecnologías de análisis de procesos PAT (Process Analytical Technology) (Neugebauer et al., 2024), métodos de medición de tiempos de ciclo y proceso MTM (Methods Time Measurement) (Gorobets et al., 2021) y diseño asistido por ordenador (CAD) para optimizar el diseño del área de producción (Arteaga, 2022).

La evaluación del molde múltiple incluyó pruebas mecánicas mediante técnicas no destructivas (NDT), como la utilización de líquidos penetrantes (Non-destructive testing) (Sherii et al., 2022), la habilitación de herramentales específicos como apoyo en el trabajo y el desarrollo de una matriz de validación (Mikkelson, 2023). Durante su implementación en una línea de producción piloto, se llevaron a cabo pruebas funcionales para evaluar la maniobrabilidad, la repetitividad del proceso y la calidad de las piezas producidas, tal y como se detalla metodológicamente.

2. Materiales y equipos

El estudio del proceso de fabricación de piezas fundidas se realizó en una microempresa manufacturera y se proyectó experimentalmente mediante la tecnología analítica de proceso PAT (Clegg, 2019), y los resultados obtenidos se estandarizaron y optimizaron mediante la medición de métodos y tiempos MTM (Gorobets et al., 2021). El desarrollo del área de proceso y el diseño del layout se realizaron con diseño asistido por ordenador CAD (Arteaga, 2022). Las pruebas de configuración mecánica y los métodos de prueba no destructiva y generalizada se realizaron mediante la técnica de penetración de colorante con NDT (Sherii et al., 2022). A continuación, se procedió a desarrollar el algoritmo de concurrencia (Galli, 2015) y una matriz de validación funcional (Mikkelson, 2023). Las marcas de compatibilidad se comprobaron mediante poka-yoke (Lazarevic et al., 2019), junto con la habilitación de herramental y la prueba del método de trabajo (Junmin y Yan, 2019). Finalmente, se integró la implementación en la línea de fabricación original, donde se realizaron pruebas funcionales, de maniobrabilidad y de validación de repetibilidad por tipo.

3. Métodos experimentales

El proceso de fabricación de piezas fundidas en la microempresa y en la línea piloto se realizó siguiendo la siguiente metodología, lo que permitió desarrollar paulatinamente los estudios y las técnicas para la implementación física, como se describe en la figura 1.

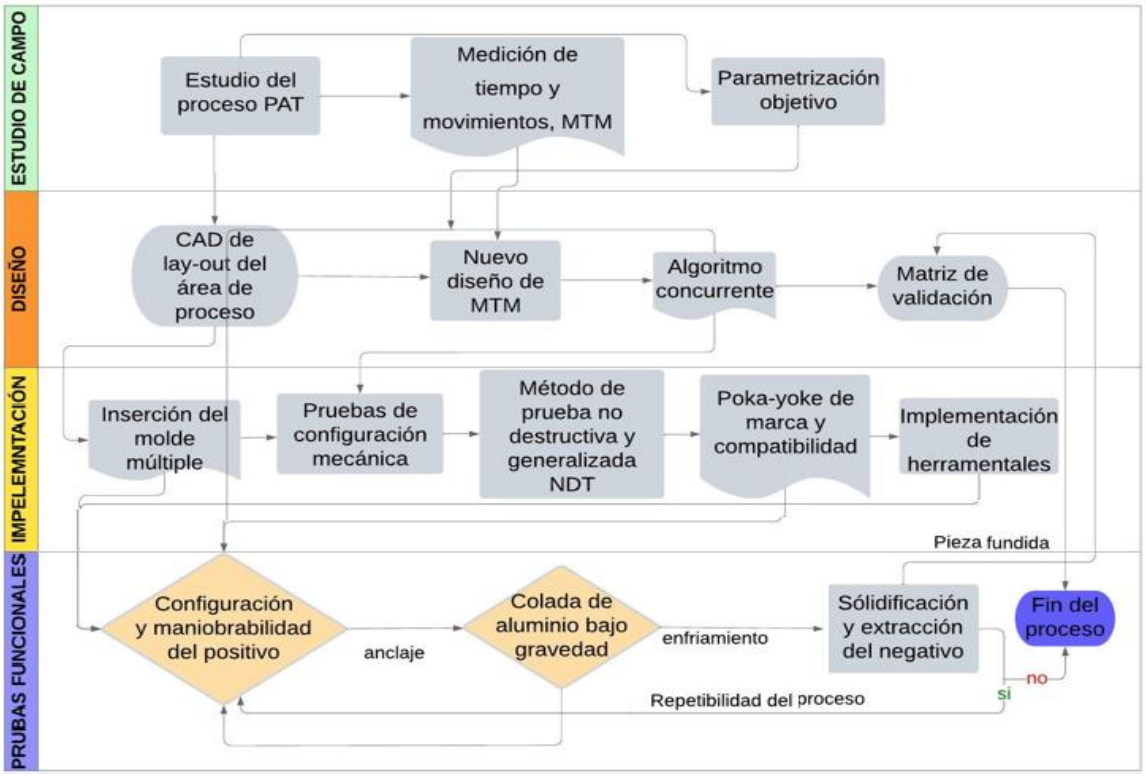


Figura 1. Metodología de implementación.
Elaboración propia.

3.1 Estudio de campo

El acceso experimental al área de fabricación de línea permitió conocer, medir y analizar los objetivos de fabricación (piezas fundidas y sus tipos y dimensiones), el proceso y sus ciclos, así como los métodos y técnicas actuales aplicados. De este modo, fue posible proyectar, perfeccionar y optimizar el diseño de las nuevas propuestas antes de su implementación.

3.1.1 Estudio del proceso PAT

Por medio de la tecnología analítica del proceso PAT (Neugebauer et al., 2024), se logró conocer, registrar y comprender la lógica del proceso, así como identificar las tareas que serían candidatas a mejora, por lo que se clasificó un proceso de estudio, con 8 actividades y un total de 31 tareas, de las cuales 1 y 3, respectivamente involucran el molde de Cano-Figueroa & Pérez-Bustamante (2022), impactará, como se muestra en la Tabla 1, y la actividad 5 es de repetibilidad de ciclo.

Tabla 1. Actividades y tareas con moldes.

CUADRO PAT: Proceso de transformación metalúrgica		
EMPRESA:	Líneas de fundición de Exfym	
PROCESO	**ACTIVIDADES**	**TAREAS**
Fabricación de: piezas objetivo de fundición de aluminio	1. Carga combustible	1. Medición de combustible
		2. Cierre de válvulas de paso
		3. Apertura y vaciado en tanque de combustible
	2. Ignición	1. Selección de boquilla
		2. Conexión intermedia tanque-horno de boquilla
		3. Precalentar boquilla en horno a baja flama (90° C)
	3. Prepraración de presión	1. Abrir válvula
		2. Encender compresor
		3. Comprobar carga a 120 lbs
	4. Encendido de horno	1. Conservar baja flama de precalentamiento
		2. Abrir válvula de combustible
		3. Moderar combustión
	5. Alimentación del horno	1. Introducir materia prima
		2. Acomodo de magerial
		3. Moderar combustión
	6. Fusión	1. Abrir válvula de combustible
		2. Máximizar combustión (630°C)
	7. Limpieza físico química	1. Cierre de válvula de combustible
		2. Adición de desgasificantes
		3. Adición de fundentes
		4. Retiro físico de escorias
		5. Apertura de válvula y máximizar combustión (630°C)
	8. Preparación de moldes y vaciado	1. Calentamiento de crisoles y moldes
		2. Cierre de válvula de combustible
		3. Retiro de crisoles y armado de moldes
		4. Vaciado a crisoles
		5. Vaciado a moldes
		6. Apertura de válvula y máximizar combustión (630°C)
		7. Iterar tareas anteriores de la 4 a la 6
		8. Fin del proceso

3.1.2 Estudio de tiempo y movimientos MTM

Con esta herramienta de estudio (Gorobets et al., 2021), se logró la medición de los tiempos de trabajo de ciclo completo de fundición bajo gravedad y la trazabilidad de operaciones para manufactura de piezas de aluminio en moldes convencionales colados bajo gravedad. En la Tabla 2, se muestra el resumen obtenido. Los atenuados en color gris fueron estudiados, pero no son relevantes, a diferencia de los remarcados en naranja, siendo objetos de medida y seguimiento.

Tabla 2. Medición de tiempos y trazabilidad del ciclo de proceso.

RESUMEN: MEDICION DE TIEMPOS					
EMPRESA:	Lineas de fundición con vaciado a moldes permanentes				
PROCESO IDENTIFICADO	**TAREAS**	**SIMBOLO**	**TIEMPO**		
			hr	**min**	**seg**
Proceo de fundición K:100 Kg.	1.1 Medición de combustible	▽		5	
	1.2 Cierre de válvulas de paso	D			5
	1.3 Apertura y vaciado en tanque de combustible	⇨		3.1	
	2.1 Selección de boquilla	D		5	
	2.2 Conexión intermedia tanque-horno de boquilla	D		6	
	2.3 Precalentar boquilla en horno a baja flama (90° C)	□		10	30
	3.1 Abrir válvula	D		0.5	
	3.2 Encender compresor	○		5	
	3.3 Comprobar carga a 120 lbs	□		3	5
	4.1 Conservar baja flama de precalentamiento	○		6	30
	4.2 Abrir válvula de combustible	D		2	
	4.3 Moderar combustión	□		4	
	5.1 Introducir materia prima	▽		10	30
	5.2 Acomodo de material dentro de horno	⇨		5	30
	5.3 Moderar combustión	□		2	20
	6.1 Abrir válvula de combustible	D		0.5	
	6.2 Maximizar combustión (630°C)	□		25	
	7.1 Cierre de válvula de combustible	D		0.5	
	7.2 Adición de desgasificantes	□		2	30
	7.3 Adición de fundentes	○		2	30
	7.4 Retiro físico de escorias	⇨		3	
	7.5 Apertura de válvula y maximizar combustión (630°C	□		1	
	8.1 Calentamiento de crisoles y moldes	□		8	30
	8.2 Cierre de válvula de combustible	D		0.5	
	8.3 Retiro de crisoles y armado de moldes	□		5	30
	8.4 Vaciado a crisoles	○		7	30
	8.5 Vaciado a moldes	○		4	30
	8.6 Apertura de válvula y maximizar combustión (630°C)	□		1	
	8.7 Iterar tareas anteriores de la 4 a la 6	□		33	
	8.8 Fin del proceso-vaciado a lingoteras	▽		3	
	Total de horas por ciclo:			**2.793**	
	Desglose: D :0.2916 □ :1.5503 ⇨ :0.1916 ▽ :0.3083 ○ :0.3095				
	Costo promedio del proceso	$		5230.5	

3.1.3 Parametrización objetivo

El objeto de estudio se sustenta en una pieza-positivo de línea y con una familia en diámetro de 6´´, de alta demanda comercial e industrial de 1 a 4 ranuras, tipo A y B, con o sin caja (C) (Cano-Figueroa et al., 2020), fabricada en aleación de aluminio, tiene opcionalmente la fabricación ligera con rayos (P), estructural sólida o combinada (P/C). Sumando un total mínimo y garantizado de 17 modelos diferentes, y un máximo de 22 (Cano-Figueroa & Pérez-Bustamante, 2022), como se muestra en la *f*igura 2**.**

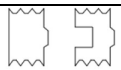
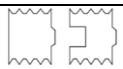
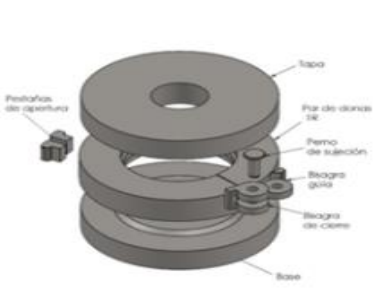
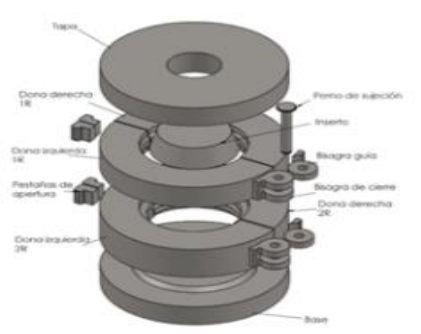
Medida	Ranura	Tipo	Perfil Geométrico	Peso (kg)
6´´	1RA 1RB	P P		1.25
	2RA 2RB	P y P/C P y P/C		2.35 2.20
	3RA 3RB	P y P/C P y P/C		3.24 3.12
	4RA 4RB	P y P/C P y P/C		4.14 4.02
Total:	**8**	**14**	**22**	**-**

Figura 2. Alcance paramétrico del molde.
Cortesía de Cano-Figueroa & Pérez Bustamante (2022).

3.2 Diseño

El molde utilizado, fue diseñado de forma asistida, bajo el esquema de estudio, prototipado hacia la fabricación que obedece a las geometrías de la tabla 3, en las que se resume el diámetro objetivo, el tipo candidato a fabricar y las opciones de configuración para cada uno, respectivamente (Cano-Figueroa et al., 2020). La manufactura y disposición física se muestra en la figura *3*, donde la construcción en acero H13 y templado simple (QST), cumple con los requerimientos del diseño, evidenciando el número de elementos que lo conforman, arreglos de ensamble y marcas poka yoke, con peso total del ensamble de 54 kg (Cano-Figueroa & Pérez-Bustamante, 2022).

Tabla 3. Diseño del molde.

Dimensión, ranura y tipo	Configuración por tipo	Dimensión, ranura y tipo
6"1RA-B PP		6"3RA-B P y P/C
6"2RA-B P y P/C		6"4RA-B P y P/C

Cortesía de Cano-Figueroa & Pérez Bustamante (2022).



Figura 3. Manufactura de molde múltiple. Cortesía de Cano-Figueroa & Pérez Bustamante (2022).

3.2.1 Diseño CAD de lay-out del área de proceso

Con la visita técnica a las instalaciones de la microempresa candidata a la implementación del molde en línea de fabricación, se realizó el levantamiento con distribución y ordenamiento de los equipos, áreas, almacenes, procesos y todas las actividades de servicio, con las que cuenta actualmente. Posteriormente con apoyo del diseño asistido en AutoCAD (Arteaga, 2022), se representó y detalló cada sección, haciendo especial énfasis en la zona de línea de fabricación bajo gravedad, indicado en el recuadro amarillo, como se muestra en la figura 4.

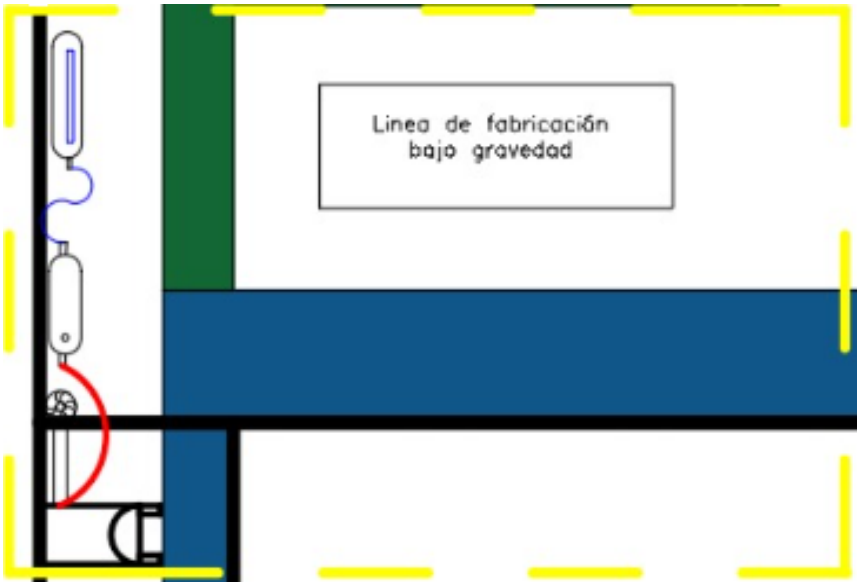


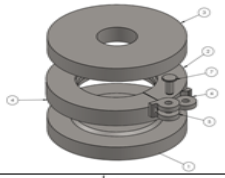
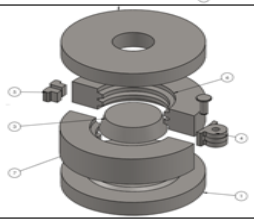
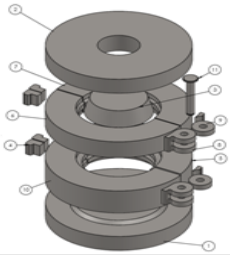
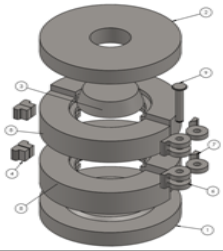
Figura 4. Línea de fabricación bajo gravedad.
Elaboración propia.

3.2.2 Diseño de algoritmo concurrente

Para lograr la concurrencia de los elementos del molde, se requirió desarrollar una lógica en relación con los conjuntos. Para ello se realizaron pruebas de configuración mecánica, validando la coincidencia entre las piezas del positivo y la proyección del negativo, en cada una de las 22 geometrías características de la figura 2. Y por medio de métodos de prueba no destructiva y generalizada NDT (Sherii et al, 2022), se realizaron con tintas penetrantes, las evaluaciones estructurales a cada pieza y con ello las superposiciones del negativo, marcas, adiciones poka-yoke e instrucciones de configuración de la tabla 4, con la finalidad de cumplir con un método correcto de armado-cierre y una fácil técnica de apertura-desmoldeo.

En esta etapa se identificaron las piezas y se renombraron con literales de fácil personalización cómo: base sin inserto (a), base con inserto (b), tapa (c), donas de 1 ranura (d), donas de 2 ranuras (e) y una adicional de 2 ranuras (f), mostradas en la tabla 4. Los diferentes requerimientos de fabricación pueden adaptarse e incrementarse, utilizando combinaciones intercambiables como base de rayos (g) y tapa de rayos (h) para los tipos P, alcanzando hasta 26 posibles intercambiables.

Tabla 4. Configuración y algoritmo del molde.

Dimensión y ranura	Configuración por tipo	Algoritmo de configuración y compatibilidad para ranura y tipo	Máximo configurable
6"1RA-B		Ranura A, tipo P: a+c+d, g+d+h Ranura B, tipo P: a+c+d, g+d+h	2 2
6"2RA-B		Ranura A, tipo P: a+e+c Ranura B, tipo P: a+c+e Ranura A, tipo P/C: b+e+c, b+e+h Ranura B, tipo P/C: b+e+c, b+e+h	1 1 2 2
6"3RA-B		Ranura A, tipo P: a+d+e+c Ranura B, tipo P: a+d+e+c Ranura A, tipo P/C: b+d+e+c, b+d+e+h, g+d+e+h Ranura B, tipo P/C: b+d+e+c, b+d+e+h, g+d+e+h	1 1 3 3
6"4RA-B		Ranura A, tipo P: a+e+f+c Ranura B, tipo P: a+e+f+c Ranura A, tipo P/C: b+e+f+c, b+e+f+h, g+e+f+h b+e+f+c, b+e+f+h, g+e+f+h	1 1 3 3
		Total:	26

Adecuación del original de Cano-Figueroa & Pérez Bustamante (2022).

3.2.3 Diseño de la matriz de validación

El proceso de implementación requirió previamente y de forma sistemática, conocer los requisitos definidos del proceso, medidos y con registro. Para ello se desarrolló en concordancia con el PAT del proceso y la expertiz técnica operativa en línea de fabricación, un identificador de los alcances que tendría el molde, ya que, de este, dependería el éxito de conformación del proceso de fundición de piezas de aluminio, dimensionadas en 6 pulgadas. Por lo que se elaboró una matriz de validación (Mikkelson, 2023), mostrada en la tabla 5, que tuvo la finalidad de detectar posibles errores en las variables, así como la etapa exacta donde pudieran presentarse inconsistencias que impactaran con demoras, retrabajos o rechazos de producto, todo ello previo a etapa de implementación, garantizando la correcta funcionalidad del sistema.

Las relaciones existentes entre: las variables, indicadores, ítems, opciones de respuesta y criterios de evaluación, miden la función geométrica, alcance paramétrico y concordancia entre partes, confirman en la verificación, si el molde coincide con los requerimientos funcionales esperados.

Tabla 5. Matriz de validación del molde.

MATRIZ DE VALIDACIÓN															
VARIABLES	INDICADOR	No	ITEMS	OPCION DE RESPUESTA				Criterios de evaluación						Observaciones y/o recomendaciones
				A	B	C	D	Relación entre la variable y el indicador		Relación entre el indicador y los Items		Relación entre los Items las Opciones de		
								SI	NO	SI	NO	SI	NO	
Armado	Cierre con inserción de perno en articulación	1	La pieza base es estable con la mesa de trabajo											
		2	La pieza coincide con el subsecuente de su algoritmo											
		3	La pieza subsecuente embonan fácilmente con la anterior											
		4	La pieza coicide con el tercer subsecuente											
		5	Las piezas coiciden con la articulación											
		6	Las piezas coiciden con las pestañas de apertura											
		7	Las piezas se fijan por el perno sujetador											
		8	El molde contiene la colada bajo gravedad hasta el bebedero											
Desarmado	Apertura con extracción de perno en articulación	9	Las piezas permanecen unidas al retirar el perno sujetador											
		10	Las piezas se separan por toque en la pestaña de apertura											
		11	La tapa se separa al comprimir la pieza fundida											
		12	La base se separa de la pieza al mover la pieza fundida											
				Excelente	Bien	Regular	Deficiente							

Elaboración propia.

3.3 Implementación

Con la metodología previa, se procedió y logró la fase de introducción del molde a la línea de fabricación bajo gravedad de la microempresa, esto sustituyó y dejo de lado a por lo menos 16 moldes individuales convencionales, utilizados para cada tipo de pieza. La siguiente secuencia muestra paso a paso su implementación.

3.3.1 Inserción del modelo múltiple a la línea de fabricación

El molde múltiple sustituyo a los diferentes sistemas individuales convencionales de colada bajo gravedad. Dentro de la línea de vaciado a gravedad indicada en el lay-out de la figura 4, se realiza la prueba de configuración mecánica del molde, y la de compatibilidad entre la mesa de vaciado y el molde, como se muestra en la figura 5, donde las disposiciones técnicas operativas para las variables de armado y desarmado del ensamble, trabajan de forma opuesta al proceso de vaciado, por lo que requiere el 50% de la mesa de trabajo libre de obstrucciones, esto concluye que la zona conveniente de prueba, deberá de ser a la derecha del operario de conformación.

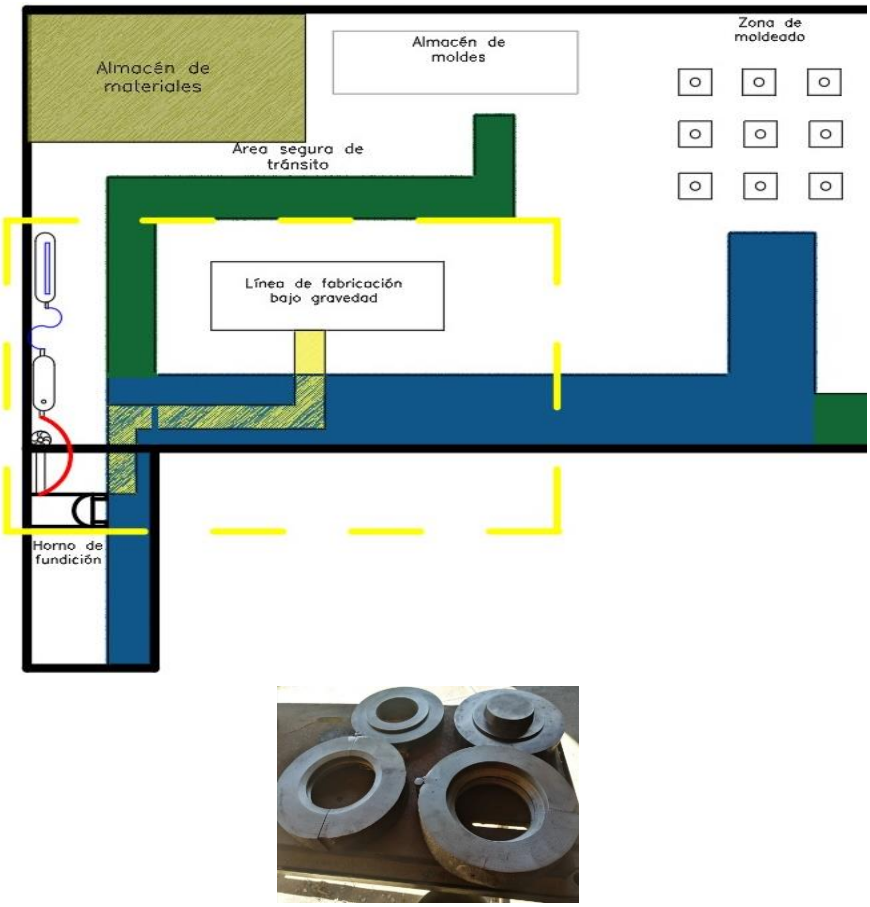


Figura 5. Mesa de vaciado inserta en línea de fabricación bajo gravedad.
Elaboración propia.

3.3.2 Herramentales

El proceso de conformado requería específicamente que las variables de armado y desarmado de la matriz de validación del molde, acoplaron de forma correcta con los poka-yokes y marcas de coincidencia del molde, adicionalmente estos operan de forma externa con herramentales capaces de manipular las piezas componentes del sistema, generando: cierre, apertura, apisonamiento de la mazarota, extracción del positivo o pieza fundida, además de soportar las temperaturas de trabajo, que pueden llegar hasta los 450 °C, todos estos de manera periódica durante el vaciado. Los herramentales cuentan con aditamentos de aislante térmico para mejor operatividad, aunque requieren habitualmente ser enfriados en las extensiones metálicas por medios líquidos, para un mejor manejo operativo. Los herramentales mínimos necesarios son: pinzas mecánicas, de extensión de mordaza mecánica y de punta larga, cinceles cortafríos, martillos de bola y anclas de presión.

3.3.3 Prueba de conformado funcional

El proceso de fundición da inicio con el cambio de estado de los metales y elementos de aleación en el horno de acuerdo a las especificaciones solicitadas por el cliente, una vez que el material se encuentra en estado líquido, desgasificado y limpio químicamente, se deduce que se encuentra listo para llevar a cabo la colada a los moldes permanentes. En la figura 6, se muestran los pasos de preparación, el molde múltiple se precalienta por aproximación en el mismo medio de fusión, posteriormente se lleva al extremo

derecho de la mesa de trabajo en la línea de fabricación y se realiza la maniobra de configuración de armado con ayuda de los poka-yokes, marcas, anclaje, herramentales y el algoritmo de configuración, este último obedece a los requerimientos de fabricación de línea pull (Wang & Sun, 2019), posteriormente se realiza la colada bajo gravedad con crisol al molde, se comprime la mazarota y cuando ésta solidifica, refiere que la pieza se encuentra sólida entre 250-300 °C, y se procede a la apertura del molde para la extracción del positivo o pieza fundida. Si esta pieza se alinea a la matriz de validación, se posiciona a la izquierda de la mesa de fabricación, de lo contrario regresará al proceso de fusión. El proceso entra en ciclo de repetibilidad, con un mínimo de 80 y un máximo de 120 positivos iguales o diferentes, de la familia dimensional de 6 pulgadas, mostradas en la tabla 6, esto por corrida.

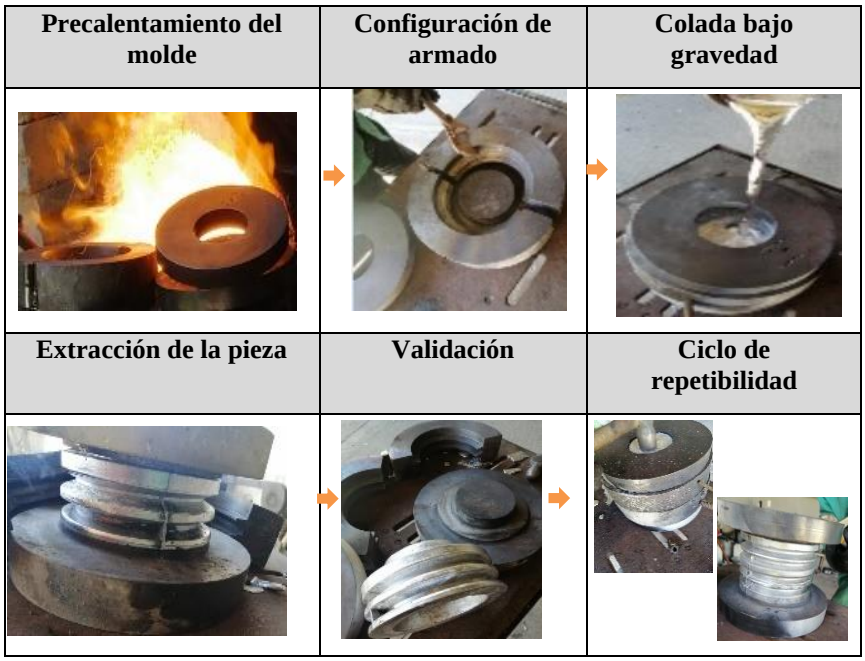


Figura 6. Desempeño funcional del molde.
Elaboración propia.

De forma iterativa y de acuerdo con los alcances del molde, se desarrollaron las diferentes configuraciones del algoritmo, como se muestra, detalla y relacionan en la figura 7 (para 2RA-B, P y P/C) y en la figura 8 (para tipo 1RA-B, P y 3-4RA-B, P-P/C), mostrando desde el calentamiento, armado del molde, compatibilidad, colada, enfriamiento, extracción, hasta la pieza final conformada, para mejor visualización, los resultados se registran y ejemplifica en la matriz de validación.

MATRIZ DE VALIDACIÓN															
VARIABLES	INDICADOR	No	ITEMS	OPCION DE RESPUESTA				Criterios de evaluación						Observaciones y/o recomendaciones
				A	B	C	D	Relación entre la variable y el indicador		Relación entre el indicador y los Items		Relación entre los Items las Opciones de		
								SI	NO	SI	NO	SI	NO	
Armado	Cierre con inserción de perno en articulación	1	La pieza base es estable con la mesa de trabajo	x				x		x		x		
		2	La pieza coincide con el subsecuente de su algoritmo	x				x		x		x		
		3	La pieza subsecuente embonan fácilmente con la anterior		x			x		x		x		
		4	La pieza coicide con el tercer subsecuente	x				x		x		x		
		5	Las piezas coiciden con la articulación		x			x		x		x		
		6	Las piezas coiciden con las pestañas de apertura	x				x		x		x		
		7	Las piezas se fijan por el perno sujetador			x			x		x	x		
		8	El molde contiene la colada bajo gravedad hasta el bebedero	x				x		x		x		
Desarmado	Apertura con extracción de perno en articulación	9	Las piezas permanecen unidas al retirar el perno sujetador	x				x		x		x		
		10	Las piezas se separan por toque en la pestaña de apertura	x				x		x		x		
		11	La tapa se separa al comprimir la pieza fundida		x			x		x		x		
		12	La base se separa de la pieza al mover la pieza fundida		x			x		x		x		
				Excelente	Bien	Regular	Deficiente							



Figura 7. Desempeño funcional para 2RA-B, P y P/C.
Elaboración propia.



Figura 8. Desempeño funcional para 1RA-B, P y 3-4RA-B, P-P/C.
Elaboración propia.

Con las corridas completadas, se configuró cada arreglo del molde para conformación, en función del alcance geométrico de los positivos (figura 2), fabricando repetidamente las piezas con diversidad de tipo, como se muestra en resumen la figura 9, donde se alcanzó la fabricación objetivo, de 22 piezas dimensionadas en 6´´, ranuras A y B, tipos P y P/C.

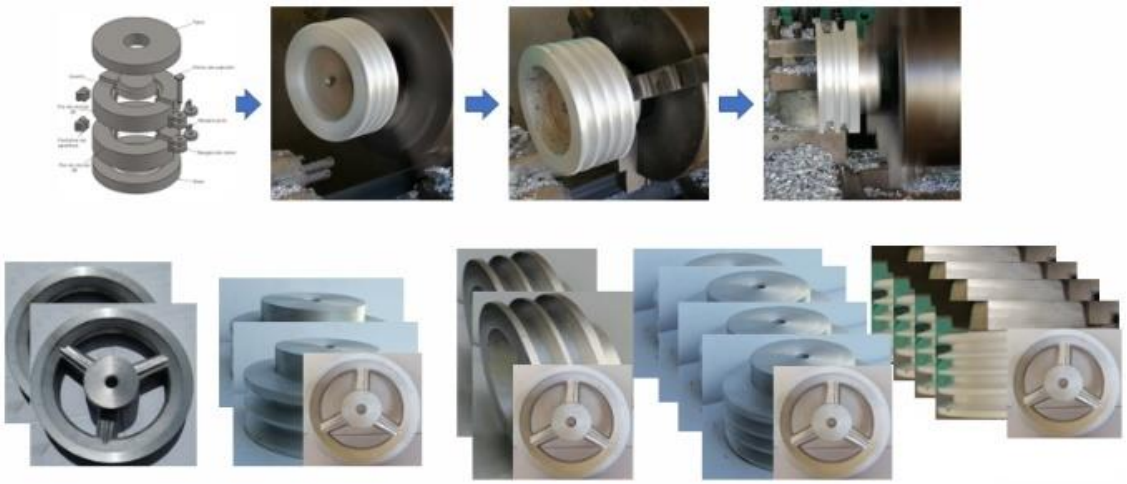


Figura 9. Positivos conformados con el molde múltiple.
Elaboración propia.

Concluido el ciclo de repetibilidad y validado el desempeño del molde y la calidad geométrica de la pieza, el molde se reserva en estantes libres de humedad y listo para próximas corridas de fabricación.

4. Discusión de resultados

Los datos registrados en la matriz de validación permitieron identificar el comportamiento y funcionalidad del molde durante 7 corridas completas de conformación, obteniendo: cómo se detalla en la figura 10, donde las variables son el armado y desarmado del molde y los indicadores refieren, al cierre con inserción de perno y apertura con la extracción del perno en articulación del molde, con la técnica de trabajo utilizada por el operario y la manipulación del molde, se alcanzó de forma global en las corridas una relación del 85.71% este entre las variables y el indicador, comportándose de forma funcional, el 14.28% no satisfactorio registrado en este mismo, se debió a las iniciales demoras en el ítem 7, puesto que el perno giraba y se desubicaba fuera de su alojamiento, es decir, rodaba sobre la mesa, por lo que fue un factor no relacionado al ensamble, mismo en el que, si se insertó bien después de la repetitividad del proceso. A forma comparativa en los moldes permanentes convencionales, no presentan esta variable mostrada, dada su estructura funcional.

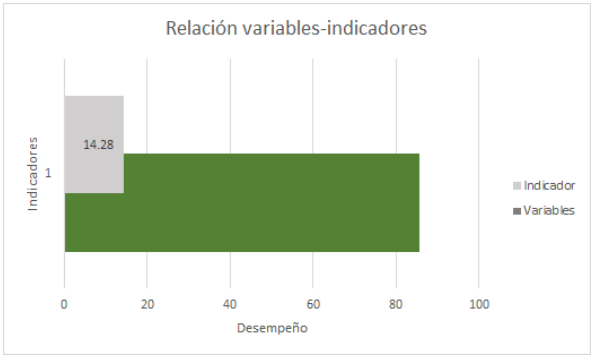


Figura 10. Relaciones de desempeño de la matriz de validación.
Elaboración propia.

Los registros, mostraron cierta complicación inicial a el armado de coincidencia con la articulación, por lo que la relación mostrada en la figura 11, entre el indicador y los ítems,

alcanzó el 91.66% positivo real, dado que las solicitudes se lograron en todos los ítems, excepto el número 5, donde se hace referencia a que las piezas del molde coincidan con la articulación, esto se debió y adjudicó a otras causas referentes a la no dominada técnica operativa, pero ajena al ensamble, mismas que lograron subsanarse con apoyo en el algoritmo, marcas, poka yokes del sistema y repetibilidad del ciclo.

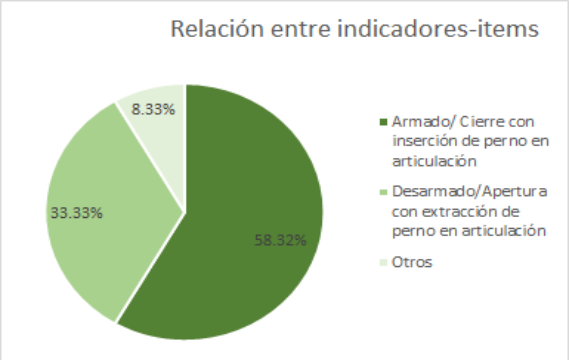


Figura 11. Relaciones de armado-desarmado de la matriz de validación.
Elaboración propia.

Los registros generales de validación, mostraron un 58.33% alcanzado en la relación entre el indicador cierre-apertura y los ítems mostrada en la figura 12, donde 1, 2, 6, 7, 8, 9 y 10, registraron excelente desempeño, es decir, para el cierre y la apertura: la base es estable con la mesa de trabajo, la pieza coincide con el algoritmo y con las pestañas de apertura, se fijan con el perno sujetador y el molde contiene la colada bajo gravedad hasta el bebedero de la pieza positiva, así como excelente desempeño a la apertura, donde las piezas permanecen unidas al retirar el perno sujetador y se separan por toque en la pestaña de apertura. Los ítems 4,11 y 12 alcanzaron un 25%, con una buena respuesta al ejercicio de coincidencia con el tercer subsecuente, así como la tapa y la base se separaron al comprimir y mover el positivo, respectivamente. Sin embargo, el 8.33% del ítem 3, registró un regular desempeño, ya que, de forma continua, la pieza subsecuente no embonaba fácilmente con la anterior, derivado de la no familiarización operativa con el ensamble. El 8.33% restante, registró un deficiente ejercicio en el ítem 5, esto se debió a que las piezas no coincidían con la articulación de cierre, causando confusión por omisión por parte del operador a las marcas y poka yokes, derivado del posicionamiento físico sobre la mesa durante el desarmado, requiriendo de un ajuste visual-geométrico previo al cierre con el perno sujetador.

También se observó que después de un número de 13 ciclos de conformado de piezas positivas, se estabilizó paulatinamente esta relación, esto bajo la técnica de un mismo operario.

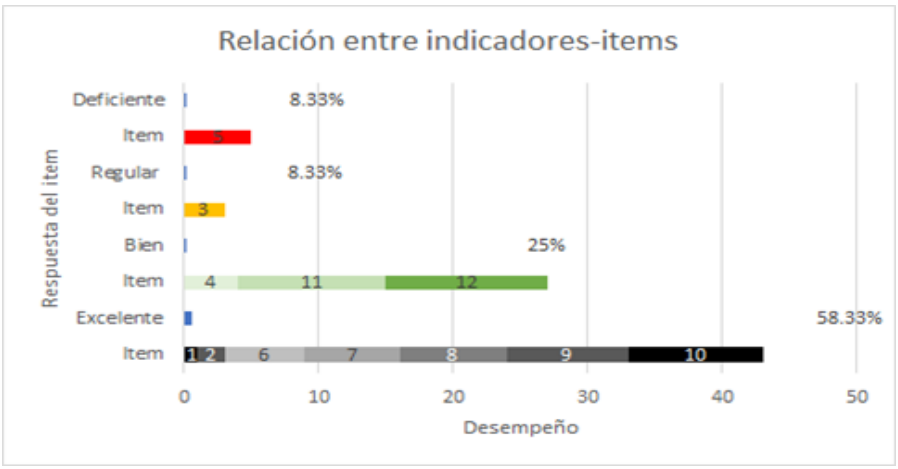


Figura 12. Relaciones de respuesta a los ítems en la matriz de validación.
Elaboración propia.

La relación que prevaleció entre los ítems y las opciones de respuesta, fueron una constante en cada una de las corridas y ciclos de conformado, como se muestra en la figura 13, donde las interacciones entre el algoritmo y la técnica de operativa, marcaba la tendencia del resultado, siendo la parte de evaluación del ítem, la determinante para evaluar el grado de desempeño y satisfacción para cada ciclo de fabricación con el molde. Observando que la curva de aprendizaje a la maniobrabilidad de los moldes tradicionales, es diferente a este molde múltiple, pero con apoyo en el algoritmo de armado, se observa subsana considerablemente y con tendencia a la baja a través del tiempo.

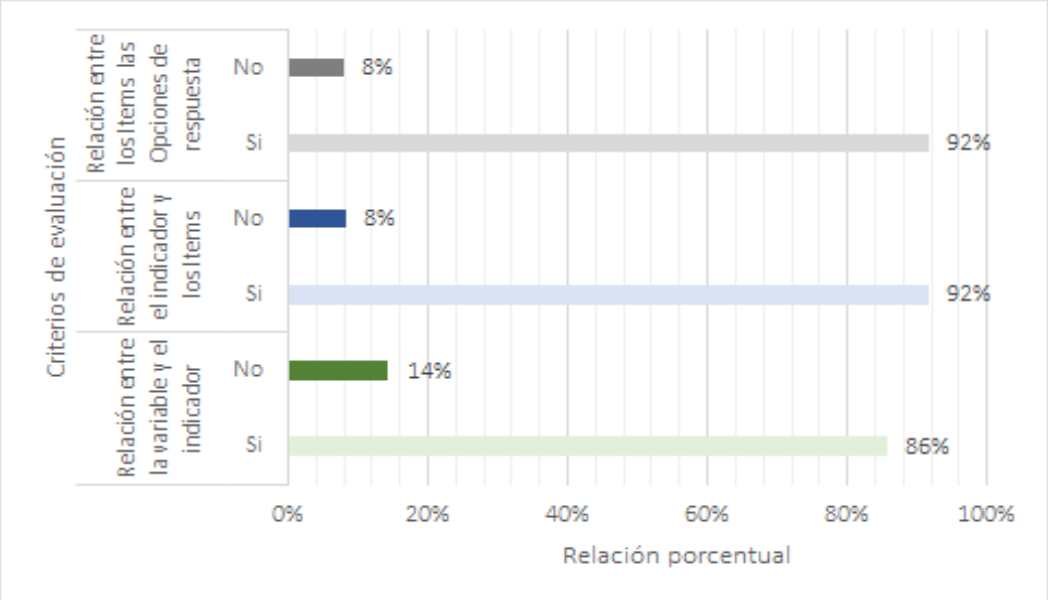


Figura 13. Evaluación porcentual de la matriz de validación.
Elaboración propia.

Lo anterior permitió evaluar la funcionalidad del molde en línea de fabricación, y compararlo con el desempeño de los moldes convencionales que se utilizaban con anterioridad este nuevo implemento, encontrándose que la intercambiabilidad y compatibilidad de todos los moldes por tipo son la principal diferencia, como se muestra en la figura 14, pasando de valores mínimos de los moldes convencionales de 0-50%, 0-40%, 0-20% y 0-40%, a un 98-100% con el molde múltiple. Así como una relativa coincidencia desde en la precisión, articulación y maniobrabilidad, donde los moldes convencionales muestran que a mayor número de ranuras y/o tipos estos parámetros tendían a minimizar sus resultados, pero dentro de los funcionales desde un 83% hasta un 98% de forma global, a diferencia del múltiple, que de forma individual su mínimo fue del 96 y el máximo del 98%. Una muestra relevante y significativa de la implementación del molde, fue que el costo de este es 25% mayor con referente al molde más sencillo de 1 ranura tipo P, pero un 88% menor de forma global, es decir considerando la suma de los costos por unidad de tipo y ranuras que se requiere fabricar para alcanzar todos lo que conformar un solo arreglo múltiple.

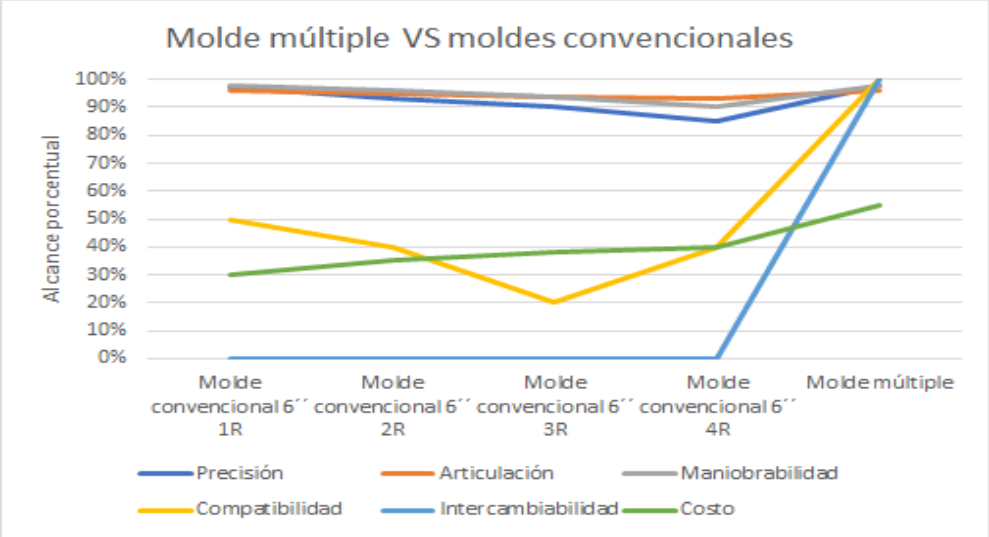


Figura 14. Comparativo por tipo de molde.
Elaboración propia.

La productividad del molde de la figura 2 y 9, se comprobó con el alcance de fabricación, por número de piezas contrastado con el tipo de molde, convencional o múltiple, cumpliendo el propósito de conformado inicial en un mismo arreglo de 22 a 1, como se muestra en la figura 15.

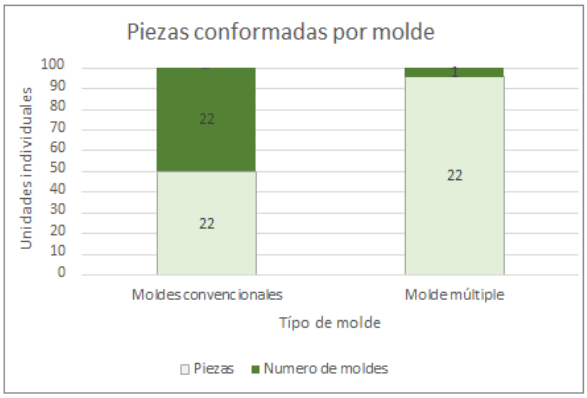


Figura 15. Evaluación productiva vs molde.
Elaboración propia.

5. Conclusiones

La implementación de este molde múltiple permitió evaluar su diseño y fabricación mediante la valoración funcional en una línea de producción, maximizando la producción dimensional y eliminando la fabricación de moldes unitarios y su elevado coste, como es el caso de otros moldes funcionales, pero convencionales, como los indicados por Lampman (2018). El molde aportó una alta adaptabilidad y compatibilidad de componentes y arreglos algorítmicos de configuración reutilizables para toda la gama disponible de un mismo dimensionamiento alcanzando un mínimo de 22 piezas diferentes a diferencia de moldes tradicionales, los de piezas múltiples, pero no de huellas múltiples. Se comprobó que el diseño y la fabricación cumplían sin adversidades en el proceso de implementación física con el 97% proyectado, detectando que la práctica abate y subsana el tiempo de armado y desarmado del molde, estabilizando la curva de aprendizaje operativa derivada de la transición modular, es decir del uso de moldes convencionales a moldes múltiples, a diferencia de lo que ocurría en las implementaciones individuales. A corto plazo, el funcionamiento del molde cumple con las demandas de un mecanismo de conformación, por lo que a medio y largo plazo puede presumir de alcanzar fácilmente las 3000 secuencias funcionales o corridas, para las que fue creado. Los moldes múltiples son un campo viable en la fabricación dimensional y tipificada de piezas coladas bajo gravedad y pueden escalarse para abarcar una gran variedad de piezas. Son una opción

innovadora para migrar a nuevas formas de fabricación masiva, ya que superan la funcionalidad de los moldes convencionales a un menor coste.

Se comprobó que el estudio de procesos de fabricación, permite optimizar en función de nuevos diseños, disposiciones, fabricaciones e implementaciones de moldes adaptables a familias de línea, que no solo facilitan el trabajo de manufactura del producto, sino que suman conocimiento y representan una técnica nueva, como alternativa, que sin duda seguirá evolucionando para hacer más rentables a las muchas microempresas de manufactura en nuestro país.

6. Agradecimientos

A Exfymsa, por el financiamiento y las facilidades para el éxito de implementación de este proyecto.

A la Escuela Superior de Ciudad Sahagún–UAEH y CIATEQ por la formación, sustento y colaboración y durante la implementación de este proyecto.

7. Referencias

1. Lampman, S. (2018). *Permanent Mold Casting of Aluminum Alloys*. https://doi.org/10.31399/ASM.HB.V02A.A0006513
2. Bush, Dastin, M., Regner, Erik., Kolvin, Edvard, L., Myuller, Larri, N., Riodzha, Roberto, Dzh., Bodili, Brendon, Khendrikson. (2019). Methods for production of forged products and other processed products.
3. Byczynski, Glenn, Edwin., Elsayed, Abdallah., Lombardi, Anthony, Marco. (2020). Aluminum Casting Alloy, Aluminum Cast Component and Method for the Production of an Aluminum Cast Piece.
4. Carrera, E. (2021). Estudio de los mecanismos de desgaste en moldes metálicos en contacto con aluminio líquido (Tesis Doctoral). UANL, México.
5. Cano-Figueroa, M. A., Pérez-Bustamante, R., & Moreno-Alta, M. (2020). Diseño de prototipo de molde multiparametrizable para manufactura rápida. *Revista Nthe*, Edición Especial, 34, 37-48. ISSN: 2007-9079. http://nthe.mx/detalleArt.php?id=154
6. Cano-Figueroa, M. A., & Pérez-Bustamante, R. (2022). Diseño y configuración de molde progresivo para dispositivos mecánicos de tracción. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica (RIIIT)*, 10(56), 17-32. https://www.riiit.com.mx
7. Daniel, Mikkelson. (2023). HYBRID Modeling Validation and Verification Status Matrix. doi: 10.2172/2318699
8. D.H., Reifsnyder., N.L., McKnight., B., Kelley. (2010). 3.44 – Process Validation. 3:511-519. doi: 10.1016/B978-0-08-088504-9.00239-7
9. *Casting Aluminum Alloys* (pp. 123–131). (2022). Elsevier eBooks. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819726-4.00087-9
10. Erazo-Arteaga, Víctor A. (2022). Computer-aided design, manufacturing, and analysis (CAD/CAM/CAE) and other digital manufacturing product development techniques in Latin America. *Información tecnológica*, *33*(2), 297-308. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000200297
11. Flores Benítez, F. R., & Núñez Silva, G. B. (2022). Aplicación del Lean Manufacturing a una pequeña empresa de fundición metálica. *E-IDEA 4.0 Revista Multidisciplinar*, *4*(11), 18-30. https://doi.org/10.53734/mj.vol4.id216

12. Galli, R. (2015). *Principios y algoritmos de concurrencia*. Ricardo Galli.
13. Geoffrey, Sigworth. (2018). Aluminum Casting Alloys and Casting Processes. doi: 10.31399/ASM.HB.V02A.A0006524
14. Lazarevic, M., Mandic, J., Sremcev, N., Vukelic, D., & Debevec, M. (2019). A systematic literature review of Poka-Yoke and novel approach to theoretical aspects. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, *65*(7-8), 454-467.
15. Ian, Clegg. (2019). Process analytical technology. 149-173. doi: 10.1016/B978-0-08-102824-7.00007-5
16. Lago, A. E. (2015). *INGENIERÍA INDUSTRIAL: Métodos y tiempos con manufactura ágil*. Alfaomega Grupo Editor.
17. Lazarevic, M., Mandic, J., Sremcev, N., Vukelic, D., & Debevec, M. (2019). A systematic literature review of Poka-Yoke and novel approach to theoretical aspects. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, *65*(7-8), 454-467.
18. López, D. C. (2016). Factores de calidad que afectan la productividad y competitividad de las micros, pequeñas y medianas empresas del sector industrial metalmecánico. *Entre ciencia e ingeniería*, *10*(20), 99-107.
19. Pedro, Munari., Eduardo, Beker., Guilherme, Marinho, Coelho., Kamyla, Maria, Ferreira., Socorro, Rangel., Maristela, Oliveira, dos, Santos., Ricardo, Santos, de, Oliveira., Juan, C., Cutipa-Luque., Jorge, L., Huarca-Quispe., Eduardo, S., Zanutti., José, Alberto, Cuminato., Francisco, Louzada. (2023). Foundry planning optimization: a decision support tool for a real-world case. doi: 10.33774/miir-2023-kwwcv
20. Peter, Neugebauer., Manuel, Zettl., Daniel, Moser., Johannes, Poms., L., Küchler., Stephan, Sacher. (2024). Process analytical technology in Downstream-Processing of Drug Substances– A review. International Journal of Pharmaceutics, 124412-124412. doi: 10.1016/j.ijpharm.2024.124412
21. Ramos, Serafín, 2019. Manufactura de moldes. Metalmecánica Internacional. Axioma B2B Marketing. México. Edición 2, Vol. 24. Pág. 12-17
22. Serhii, Fomichov., Yevgenia, Chvertko., Serhii, Minakov., Igor, Skachkov., Anna, Banin. (2022). Non-destructive Testing. 151-213. doi: 10.1007/978-3-031-34800-6_4
23. Shi, Junmin., Li, Yan. (2019). Method for testing working efficiency.
24. Valentina, Gorobets., Valentin, Holzwarth., Christian, Hirt., Noelle, Jufer., Andreas, Kunz. (2021). A VR-based approach in conducting MTM for manual workplaces. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 117(7):1-10. doi: 10.1007/S00170-021-07260-7
25. Wang, Jin., Sun, Qinghua. (2019). Pulling chain of production line conveying equipment
26. Wu, Cheng-Kuan. (2021). Forging cast method using thin shell mold.
27. Zemborain Martínez-Pita, P. (2024). *Optimización del proceso de fundición de componentes diseñados con criterios de diseño generativo. Aplicación del test de colabilidad*.