

Moldes polivalentes: más producto, menos inversión

Martha Angélica Cano Figueroa; Elsa Maria de la Calleja Mora;
Hugo Arcos Gutiérrez; Víctor Hugo Mercado Lemus

RESUMEN

En el presente capítulo se presenta el diseño, fabricación e implementación de un molde polivalente y parametrizable para fundición a gravedad, como una solución innovadora ante los desafíos de flexibilidad y costo en la industria manufacturera. Esto frente a un paradigma tradicional de moldes unitarios por pieza, ya que este sistema permite la fabricación de múltiples geometrías (mínimo 22 distintas) mediante un único conjunto, optimizando recursos, espacio y tiempo de producción. La metodología, analítica y experimental, incluyó el desarrollo de un prototipo funcional probado en una línea piloto, donde se validó su desempeño operativo. Los resultados demostraron una alta eficiencia técnica en materia de ensamblaje, en precisión y en maniobrabilidad. Desde una perspectiva económica, aunque el costo de fabricación del molde polivalente fue una cuarta parte superior al de un molde unitario convencional, el ahorro global alcanza y elimina la necesidad de múltiples moldes específicos. Se concluye que este sistema representa una alternativa viable y escalable, que alinea la fundición con los principios de la manufactura avanzada y la Industria 4.0, mejorando la productividad y facilitando la migración hacia modelos de producción más flexibles y rentables.

Palabras clave: moldes polivalentes, fundición a gravedad, parametrización, eficiencia manufacturera.

Cómo citar: Cano, M., de la Calleja, E., Arcos, H., Mercado, V. (2026). Moldes polivalentes: más producto, menos inversión. En Peña Guzmán, C. *Mujeres y su impacto en la ciencia y tecnología latinoamericana*. High Rate Consulting. <https://doi.org/10.38202/mujeresimpacto14>

Multipurpose molds: more product, less investment

ABSTRACT

In this chapter, the design, manufacturing, and implementation of a multipurpose and parameterizable mold for gravity casting are presented as an innovative solution to the challenges of flexibility and cost in the manufacturing industry. In contrast to the traditional paradigm of single molds for each piece, this system allows the production of multiple geometries (a minimum of 22 different ones) using a single set, optimizing the resources, the space, and the production time. The methodology, of an analytical and experimental nature, included the development of a functional prototype tested on a pilot line, where its operational performance was validated. The results demonstrated high technical efficiency in assembly, precision, and maneuverability. From an economic perspective, although the manufacturing cost of the multipurpose mold was one quarter higher than that of a conventional single mold, the overall savings are significant and eliminate the need for multiple specific molds. It is concluded that this system represents a viable and scalable alternative that aligns casting with the principles of advanced manufacturing and Industry 4.0, improving productivity and facilitating the transition toward more flexible and profitable production models.

Keywords: multipurpose molds, gravity casting, parameterization, manufacturing efficiency.

INTRODUCCIÓN

La evolución de los procesos de fundición ha sido clave en el desarrollo de la manufactura moderna, especialmente en sectores donde cuestiones como la precisión, la eficiencia y la adaptabilidad son fundamentales. En este contexto, el diseño e implementación de moldes polivalentes y parametrizables representa una innovación significativa que responde a las exigencias de la producción industrial contemporánea. Estos moldes permiten la fabricación de múltiples piezas con geometrías diversas, optimizando recursos, espacio y tiempo, y facilitando la transición hacia modelos de producción más flexibles y escalables.

La planificación de proyectos de fabricación de piezas fundidas requiere metodologías estructuradas que garanticen la viabilidad técnica y económica del proceso. En este sentido, Goncalves y Chaves (2000) hacen la propuesta de un enfoque sistemático para la elaboración de proyectos, considerando parámetros críticos como diseño del molde, control térmico y selección de materiales. De manera complementaria, estudios recientes destacan la relevancia de los moldes en la producción industrial moderna, señalando su papel fundamental en la optimización de ciclos y reducción de costos (Iberian Press, 2025). Esta combinación de perspectivas permite consolidar estrategias que integran principios tradicionales con innovaciones actuales en la industria de la fundición.

La presente investigación tiene como objetivo el diseño, fabricación e implementación de un molde polivalente para fundición a gravedad, capaz de adaptarse a diferentes configuraciones geométricas mediante parametrización. Esta

propuesta busca maximizar la productividad, perfeccionar el proceso de fabricación y reducir los costos generales asociados a la producción de moldes unitarios. Como señalan Mir-Labrada et al. (2023), “el empleo repetido del mismo molde para obtener un gran número de piezas iguales permite una elevada productividad, precisión dimensional y reducción de materiales fundidos” (p. 145).

La metodología empleada fue de carácter analítico, físico y experimental. Se desarrolló un prototipo funcional que fue sometido a pruebas en una línea de producción piloto, evaluando su maniobrabilidad, repetibilidad y eficiencia. Los resultados obtenidos fueron contundentes: una eficiencia global de ensamblaje del 97 %, precisión del 96 % y maniobrabilidad del 98 %, lo que demuestra la viabilidad técnica del sistema. Además, este molde permitió la fabricación mínima de 22 piezas distintas, con previsión de alcanzar hasta 26, en contraste con el igual número de otros moldes unitarios que tradicionalmente serían necesarios.

Desde una perspectiva económica, aunque el coste de fabricación del molde polivalente fue un 25 % superior al de un molde convencional, el ahorro global fue del 88 % al considerar la sustitución de múltiples moldes unitarios. Este hallazgo coincide con lo expuesto por Ruiz Sánchez et al. (2024), quienes llaman la atención de que “la integración físico-digital y la parametrización de moldes permiten mantener bajo control la producción con alta efectividad, reduciendo defectos y optimizando el proceso” (p. 78).

No obstante, la implementación de este tipo de moldes requiere una capacitación adecuada de los operarios, así

como una inversión inicial más elevada. Estas limitaciones deben ser consideradas en el diseño de estrategias de adopción tecnológica en entornos industriales. Como estudios recientes han demostrado, la eficiencia y repetibilidad de los moldes parametrizables pueden ser validadas mediante simulaciones y pruebas físicas, lo que garantiza su aplicabilidad en procesos de producción masiva.

En conclusión, el molde polivalente parametrizable representa una solución innovadora y eficiente para la fabricación de piezas diversas mediante fundición a gravedad. Su implementación no solo mejora la productividad y reduce los costos, sino que también abre nuevas posibilidades para la manufactura flexible y escalable, alineándose con los principios de la Industria 4.0.

Contexto y justificación

La industria de la fundición enfrenta desafíos crecientes en cuanto a flexibilidad, eficiencia y reducción de costos. Tradicionalmente, cada pieza requiere un molde específico, lo que implica altos costos de fabricación, almacenamiento y mantenimiento. En respuesta a esta problemática, se propone el desarrollo de un molde de tipo polivalente y parametrizable, capaz de adaptarse a múltiples geometrías sin necesidad de reemplazo físico. Esta solución se alinea con los principios de la manufactura avanzada y la Industria 4.0, que promueven la personalización masiva y la optimización de recursos (Sánchez Carrión et al., 2022; Ruiz Sánchez et al., 2024).

Objetivo

El propósito consiste en el diseño, fabricación e implementación de un molde polivalente y parametrizable para fundición a gravedad, con el fin de optimizar las tareas de producción, maximizar la productividad de piezas diversas y perfeccionar el proceso de fabricación, facilitando la migración hacia nuevas formas de fabricación masiva.

METODOLOGÍA

La metodología para esta investigación de enfoque mixto combinó métodos analíticos, físico-mecánicos y experimentales, siguiendo un diseño que integra análisis funcional, simulaciones y pruebas de prototipos previas a su implementación (Dong et al., 2025). Se estructuró a partir de un análisis funcional y estructural según Bush et al. (2019), que definió los requisitos técnicos y operativos del molde polivalente, guiando cada etapa del desarrollo. Inicialmente, se elaboró un modelado CAD parametrizable conforme a Cano Figueroa y Pérez Bustamante (2022), lo que permitió diseñar cavidades ajustables y una arquitectura modular, facilitando la reconfiguración geométrica y sentando las bases para la reutilización del sistema en múltiples piezas, reduciendo así los costos asociados a la fabricación de moldes unitarios.

La selección de materiales contempló criterios de resistencia térmica, durabilidad y precisión dimensional. La misma sigue enfoques de optimización termo-mecánica

que incorporan simulaciones acopladas térmicas y estructurales conformes (Djabraian et al., 2024; Pei et al., 2025). Asimismo, se consideraron propiedades clave como coeficientes de expansión térmica y módulo elástico para minimizar deformaciones y garantizar precisión, tal como lo plantean Hitzler et al. (2022), optándose por acero H11 ESR con insertos de acero al carbono, por su excelente comportamiento ante ciclos térmicos y capacidad para mantener tolerancias estrechas. La fabricación combinó maquinado de alta precisión, como rectificado y ajuste de tolerancias, con técnicas inspiradas en fundición a la cera perdida, que aseguran la integridad estructural y el acabado dimensional requerido. Para validar el diseño, se construyó un prototipo funcional en madera de pino a partir del modelo CAD, sometiénolo a pruebas de ensamble que confirmaron la compatibilidad geométrica y la interacción correcta entre módulos.

Posteriormente, el molde fue implementado en una línea piloto de manufactura, donde se evaluaron su desempeño operacional, maniobrabilidad y repetibilidad, siguiendo criterios similares a los reportados por Flores Benítez y Núñez Silva (2022) en estudios de mejora continua en procesos de fundición. La validación de la integridad estructural se basó en simulaciones acopladas de carga térmica (Mikkelsen, 2023) y mecánica, además de inspecciones dimensionales postciclo. En particular, se utilizó un enfoque de simulación termomecánica de moldes con acoplamiento térmico-estructural para asegurar robustez y comportamiento estable bajo condiciones operacionales repetidas.



Figura 1. Detalle del proceso metodológico del molde polivalente.

Esta aproximación metodológica aseguró que el molde no solo cumpliera con las especificaciones técnicas, sino que también habilitara una producción flexible y económicamente eficiente mediante su reconfiguración y reutilización. Los detalles específicos de los parámetros de material, de tolerancias y de los resultados de las pruebas se documentan en los apartados técnicos correspondientes que siguen a continuación.

Análisis funcional y estructural

A su vez, Bush et al. (2019) describen métodos avanzados para la producción de piezas trabajadas que priorizan la integridad estructural y la optimización del flujo de material. Basándose en estos principios, en la fase inicial se aplicó un análisis funcional y estructural para definir los requerimientos técnicos del molde, asegurando que la modularidad y la intercambiabilidad se integraran como criterios fundamentales de diseño. Esta estrategia permite reducir tensiones residuales y mejorar la adaptabilidad del sistema, alineándose con prácticas industriales orientadas a la eficiencia y la calidad del producto.

La etapa de diseño del requerimiento se fundamentó en la premisa de que los moldes permanentes pueden ser reutilizados para la producción de un elevado número de piezas idénticas, con una capacidad estimada de hasta 40,000 ciclos de fundición, según estudios previos (Groover, 2012; Kalpakjian & Schmid, 2014; Cano-Figueroa et al., 2020).

Para este proyecto, se aplicó una delimitación funcional de los requerimientos técnicos, centrada en tres ejes principales: control dimensional, maximización de productividad y compatibilidad de ensamblaje para elementos impulsores de 203.2 mm de diámetro, con formas trapezoidales de 1 hasta 4 ranuras opcionales de 12.7 y 15.875 mm.

Se desarrolló un modelo base parametrizable, orientado específicamente a la fabricación de dispositivos, que sirviera como plataforma escalable para la generación de variantes posteriores. Este enfoque permitió establecer un marco de diseño modular, capaz de adaptarse a diferentes configuraciones sin comprometer la integridad estructural del molde, facilitando así su implementación en procesos de producción diversificada.

Modelado CAD

Para el desarrollo geométrico del molde polivalente, se emplearon herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD), específicamente SolidWorks y AutoCAD, con el objetivo de construir un sistema de cavidades ajustables mediante parametrización geométrica (Mikkelson, 2023). Ello permitió configurar el molde para múltiples tipos de piezas sin necesidad de modificar su estructura base, lo cual optimiza la reutilización y la adaptabilidad del sistema.

El modelado incluyó la definición de un arreglo final de configuración para cada elemento impulsor, así como la identificación de las piezas constitutivas del sistema. Se establecieron los parámetros críticos de configuración dimensional, necesarios para garantizar la precisión en el alcance de ranuras opcionales y zonas de ajuste.

La Figura 2 ilustra el modelo CAD completo, donde se presentan las variantes requeridas para cada configuración polivalente del molde. También se detallan los accesorios de sujeción y cierre, diseñados conforme a los requerimientos de ensamblaje modular. Estos elementos permiten una integración eficiente durante el montaje del molde, asegurando la compatibilidad entre componentes y la estabilidad operativa en condiciones de producción.

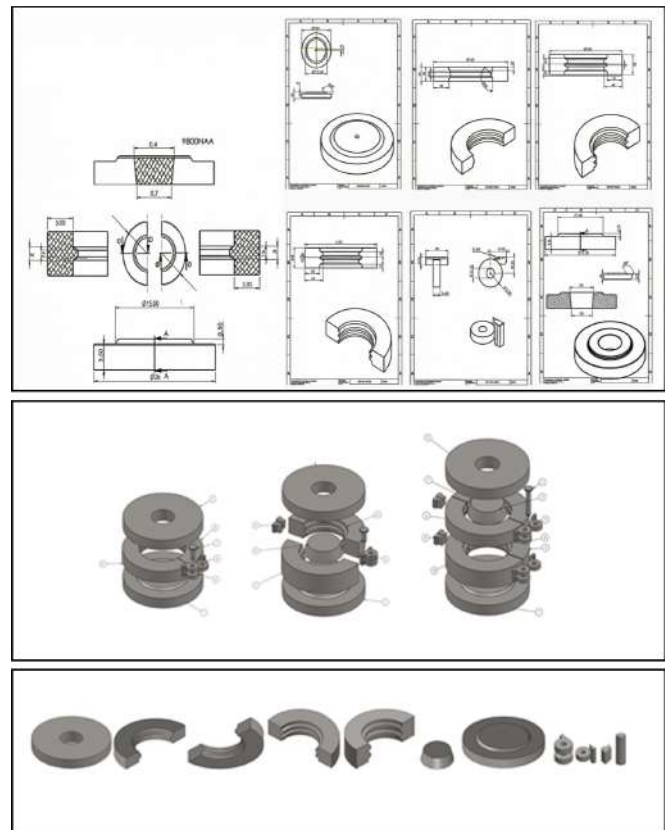


Figura 2. Detalle individual para cada componente y ensamble del sistema polivalente.

Selección de materiales

La selección del material para la fabricación del molde polivalente se realizó mediante un análisis comparativo de propiedades térmicas, mecánicas y de manufacturabilidad (Djabraian et al., 2024; Pei et al., 2025), considerando las exigencias del proceso de fundición a gravedad y centrífuga. Como resultado, se eligió el acero H11 ESR (Electro Slag Remelting), clasificado bajo la norma DIN 1.2343 y equivalente a ASTM A681-08, por sus propiedades superiores en condiciones de trabajo en caliente, alta tenacidad, resistencia a la fatiga y comportamiento isotrópico.

Este tipo de acero presenta bajos niveles de inclusiones no metálicas y una composición química controlada, lo que lo hace especialmente adecuado para moldes sometidos a ciclos repetitivos de fundición. Su estructura es refinada mediante el proceso ESR lo que garantiza una mayor homogeneidad interna y una reducción significativa de defectos estructurales, mejorando así la estabilidad dimensional y la durabilidad del molde.

La composición química del acero H11 incluye aproximadamente 0.33 % de carbono, 0.80 % de silicio, 0.20 % de manganeso, 4.75 % de cromo y 1.10 % de molibdeno, con niveles mínimos de fósforo y azufre (0.020 %), lo que contribuye a su resistencia al desgaste y a la compresión. Se suministra en estado recocido con una dureza de 235 HB

(~99 HRB), lo que permite su uso directo sin necesidad de tratamiento térmico adicional.

Para la fabricación del molde se requirieron 125 kilogramos de acero H11 ESR, cantidad calculada en función del volumen total del sistema modular, los espesores de seguridad y las zonas críticas reforzadas con insertos de acero al carbono.

Desde el punto de vista de manufactura, el acero H11 ESR ofrece excelente maquinabilidad, siendo compatible con procesos de fresado CNC, torneado, rectificado y electroerosión (EDM). Estas características permiten alcanzar altos niveles de precisión dimensional y acabados superficiales óptimos en las cavidades del molde. Además, su buena conductividad térmica favorece la disipación de calor durante el proceso de fundición, contribuyendo a la reducción de defectos térmicos en las piezas producidas.

La elección de este material se alineó con los objetivos del proyecto, al proporcionar una solución robusta, versátil y eficiente para la fabricación de un molde polivalente capaz de adaptarse a múltiples configuraciones, manteniendo la calidad, la repetibilidad y la longevidad del sistema.

Equivalencia	ASTM 681-08: H11			DIN 1.2343 (X37CrMoV5-1)			JIS SKD 6		
Composición Química:	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%P	%S	
	0.33-0.43	0.80-1.25	0.20-0.60	4.75-5.50	1.10-1.60	0.30-0.60	<= 0.030	<= 0.030	
Condición de Suministro	Recocido a una dureza máxima de 235 HB (~99HRB)								
Propiedades Físicas:	Conductividad térmica			Coeficiente de expansión térmica					
	0 – 200 °C			0 – 400 °C		0 – 400 °C		0 – 600 °C	
	27.8W/m°C			27.3W/m°C		12.7 x 10 ⁻⁶ / °C		12.9 x 10 ⁻⁶ / °C	
	192 BTU in / ft ² h °F			190 BTU in / ft ² h °F					
Propiedades mecánicas (aprox. A temperatura ambiente):	Dureza			52 HRC		45 HRC			
	Resistencia a la tensión MPa (psi)			1,800 (261,000)		1,510 (222,000)			
	Límite elástico:			1,400 (203,000)		1,200 (175,000)			

Figura 3.

Características del acero H11 SCR utilizado como material para la fabricación del molde. Cortesía: KIND&CO EDELSTAHLWERK, Serviaceroespeciales.

Prototipado de molde

La fase de prototipado se inició mediante tecnología de Prototipado Rápido (Rapid Prototyping, RP), con el propósito de validar el diseño geométrico y funcional del molde antes de su fabricación definitiva (Cano Figueroa et al., 2020). A partir del modelo 3D generado en CAD, se controlaron los parámetros geométricos y dimensionales necesarios para garantizar la precisión en las cavidades y componentes del sistema. Esta práctica se fundamenta en estudios recientes que destacan la capacidad del RP para detectar deformaciones volumétricas, así como para optimizar tolerancias en moldes funcionales antes de su construcción en metal (Rao et al., 2025; Stampone et al., 2024).

El material seleccionado para el prototipo fue madera de pino blanco (*Erblichia odorata*), debido a sus propiedades físicas adecuadas para construcción técnica, como una

gravidad específica promedio de 0.50 y una densidad de 870 kg/m³ a 75 % de humedad, según Villaseñor (2016). Las piezas fueron obtenidas mediante corte láser directo desde los archivos CAD, generando nueve componentes principales: base, tapa, inserto y ranuras.

Con posterioridad, se realizó el rectificado y ajuste dimensional de las piezas mediante Manufactura Rápida (Rapid Manufacturing, RM), mediante la utilización de procesos de torneado y refrentado para alcanzar las tolerancias requeridas, con una reducción del 5 % respecto al diseño original como margen previo al acabado final. Este proceso permitió obtener superficies con excelente calidad y precisión dimensional, listas para pruebas funcionales previas a la fabricación permanente, como se muestra en la Figura 4.

Para simular condiciones metálicas y mejorar la resistencia superficial del prototipo, se aplicó una técnica complementaria de prototipado mediante procesado directo por luz (Direct Light Processing, DLP). Un proveedor especializado proyectó el modelo 3D en formato STL sobre las piezas de madera, utilizando resinas fotocurables que se solidificaron capa por capa mediante acción capilar, sin necesidad de planarización. Este tratamiento permitió obtener acabados superficiales adecuados, protección en zonas de contacto y una aproximación precisa a las características del molde final.



Figura 4.

Prototipado de piezas del molde.

Fabricación y pruebas del molde

Las piezas fundidas en acero H11 ESR, en estado recocido, incluyó piezas de geometría redonda, recta, cónica, curvada y ranurada, alcanzaron una maquinabilidad y rectificabilidad aproximada del 70 %, lo que permitió su procesamiento eficiente mediante técnicas de mecanizado convencional y CNC, logrando ajustes dentro de las tolerancias dimensionales características: finas de 0.025–0.13 mm y basto de 0.13

mm, conforme a los estándares de precisión requeridos para moldes de alta repetibilidad, como se muestra en la Figura 5 a detalle del proceso.

Para validar la fidelidad geométrica del sistema, se realizó una comparación entre los modelos diseñados, prototipados, fundidos y maquinados, con el objetivo de determinar el grado de coincidencia dimensional entre: el diseño original, el prototipo físico y las piezas finales.

Este análisis permitió establecer una coincidencia geométrica mínima del 97 %, calculada sobre el modelo positivo, considerando una tolerancia funcional de ± 3 %.

Se realizaron pruebas de compatibilidad estructural entre los componentes críticos del molde, específicamente en los cuerpos ranurados, la base y la tapa. Estas pruebas evidenciaron una coexistencia funcional completa, es decir, un ensamble preciso que garantiza la operatividad del sistema en condiciones reales de trabajo. La compatibilidad entre elementos impacta directamente en la ejecución del algoritmo de ensamblaje, así como en la integridad del modelo y los números de ranuras, alcanzando coincidencias de hasta el 98 % en algunos subconjuntos, lo que augura un desempeño óptimo en la futura línea de manufactura.

PROCESO	SUBPROCESO	ACTIVIDADES	RESULTADOS
Fundición	Moldeado a la cera perdida	Molde de cada pieza prototipada	
	Preparación de materiales	Acero, fundentes y desgasificantes	
	Colada	Vaciado de moldes y absorción de ceras	
	Procesado de piezas fundidas	Extracción de piezas, corte de bebederos y limpieza mecánica	
Maquinado	Torneado, refrentado y asentado	Ajuste de dimensional de superficies y ranuras de acuerdo a instrucciones de proceso	
	Barrenado - roscado	Dimensionado de barrenos y prisioneros de sujeción	
	Proceso de unión	Unión por soldadura de elementos de apertura	
Articulación y correspondencia	Ensamble	Identificadores por pieza, configuración de las piezas maquinadas	
Polivalencia del molde	Compatibilidad	Ensayo de afinidad geométrica por número de ranuras	
	Intercambiabilidad	Ensayo de coexistencia de las designaciones por número de ranuras	

Figura 5. Secuencia de fabricación y pruebas para el molde.

Implementación en línea piloto de manufactura

La implementación del molde para la producción de piezas de 203.2 mm de diámetro, de 1 a 4 ranuras trapezoidal, se realizó en una línea piloto de fabricación, fundidas en aluminio, con la intención de optimizar las tareas y técnicas de trabajo, maximizar la productividad de piezas diversas y perfeccionar un proceso de fabricación. Lo expuesto anteriormente se logró de forma analítica, física y experimental en el proceso de línea.

Inicialmente, dentro del proceso se realizaron estudios y proyecciones mediante la tecnología analítica de proceso PAT (Process Analytical Technology), aplicada en entornos de manufactura con monitoreo en tiempo real (Medendorp et al., 2022). Se complementó con el estudio estandarizado de métodos y tiempo MTM (Methods Time Measurement), reconocido por su eficacia en la optimización de tiempos y ergonomía en líneas de producción (Breznik et al., 2023). El diseño asistido del layout del área de proceso mediante CAD se fundamentó en simulaciones digitales para mejorar flujo y reducir desperdicios (Akar & Safiye, 2023).

El molde múltiple se evaluó mediante un método de prueba no destructiva (NDT), técnica clave para garantizar integridad estructural sin comprometer la pieza, que es ampliamente utilizada en manufactura avanzada (Hassani & Dackermann, 2023). Posteriormente, se procedió con la identificación del algoritmo y la configuración mecánica, la matriz de validación del proceso, las técnicas de habilitación de herramienta y la prueba del método de trabajo, a partir de lineamientos de validación sistemática en entornos de Industria 4.0 (Ghobakhloo et al., 2022).

Por último, se integró con la implementación en línea de fabricación, donde se realizaron las pruebas funcionales, de maniobrabilidad y de validación de repetibilidad por tipo, como se muestra a detalle en la Figura 6.

PROCESO	SUBPROCESO	ACTIVIDADES	RESULTADOS
Identificación área de manufactura	Lay-out de área de proceso	Inserción en línea de vaciado	
Configuración de algoritmo	Guía de ensamble	Comprobar número de piezas	
	Algoritmo para ensamble	Comprobar número de ranuras	
	Ensamble de las partes	Secuencia, orientación y posicionamiento	
		Cierre de seguridad	
Validación	Armado	Cierre con inserción de pernos de articulación	
	Desarmado	Apertura con extracción de perno de articulación	
		Apertura total	
Prueba experimental	Ciclo de manufactura	Precalentamiento y armado	
		Colada	
		Extracción, armado y repetibilidad	

Figura 6. Detalle de la implementación y validación del molde en línea piloto de manufactura.

Una vez completadas las corridas de fundición, se procedió a configurar cada arreglo geométrico del molde en función de las especificaciones dimensionales requeridas para las piezas. Esta etapa permitió validar la capacidad del sistema para adaptarse a múltiples configuraciones sin alterar su estructura base.

Las piezas fueron fabricadas de forma repetitiva, manteniendo la diversidad en el tipo de ranuras (trapezoidales A y B), y con el cumplimiento de los criterios de precisión establecidos.

En síntesis, tal como se resume en la Figura 7, se logró alcanzar el objetivo de producción con la fabricación de 22 piezas distintas, todas con una dimensión estándar de 203.2 mm, utilizando un único molde parametrizable. Este resultado confirma la eficacia del diseño modular en términos de versatilidad, repetibilidad y rendimiento operativo dentro del entorno de producción piloto.



Figura 7.
Producción masiva de piezas en el molde polivalente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La implementación del molde polivalente permitió que se alcanzara una eficiencia global de ensamblaje del 97 %, con una precisión dimensional del 96 %, así mismo una maniobrabilidad operativa del 98 %, valores que reflejan un desempeño altamente satisfactorio en condiciones reales de producción. Estos resultados fueron posibles gracias a la capacitación anticipada del personal técnico, que optimizó las técnicas de operación en línea y facilitó el aprovechamiento de la intercambiabilidad estructural del molde.

La fidelidad geométrica obtenida permitió la fabricación de 22 piezas distintas a partir de un solo molde, con una proyección de alcanzar hasta 26 configuraciones funcionales, lo que representa una mejora sustancial frente a los sistemas convencionales, que requieren un molde unitario por cada tipo de pieza. Este avance evidencia la versatilidad y la escalabilidad del sistema, así como su capacidad para adaptarse a procesos de producción diversificada.

En términos económicos, aunque el coste de fabricación inicial del molde múltiple fue 25 % superior al de un molde convencional, el coste total se redujo en un 88 %, cuando se considera la suma de los moldes unitarios que reemplaza. Esta optimización financiera valida la viabilidad del sistema para su integración en líneas de producción masiva (Iberian Press, 2025), perfeccionando las técnicas de conformación de piezas fundidas por gravedad y consolidando un modelo de manufactura eficiente, adaptable y sostenible.

Durante la fase de implementación, se observó que la curva de aprendizaje asociada a la maniobrabilidad del molde polivalente difiere significativamente de la de los moldes tradicionales. Sin embargo, gracias al soporte del algoritmo de ensamblaje, esta diferencia se redujo progresivamente con el tiempo, mostrando una tendencia descendente en la complejidad operativa y una mejora continua en la eficiencia del armado.

La funcionalidad del molde fue evaluada en condiciones reales dentro de una línea de fabricación piloto, lo cual permite su comparación directa con el desempeño de moldes convencionales previamente utilizados, como se aprecia en la Figura 8.

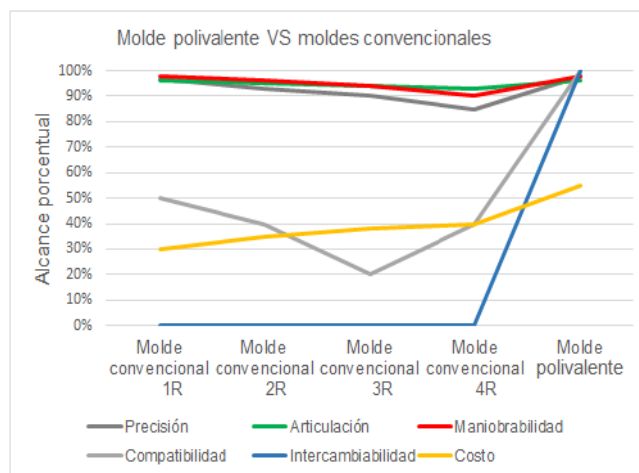


Figura 8.
Producción masiva de piezas en el molde polivalente.

La principal diferencia observada fue la intercambiabilidad y compatibilidad estructural entre los componentes del molde múltiple, que alcanzaron valores de 98 % a 100 %, frente a los rangos limitados de 0 % a 50 %, 0 % a 40 %, 0 % a 20 % y 0 % a 40 % registrados en moldes unitarios.

Asimismo, se evidenció una mejora sustancial en los parámetros de precisión, articulación y maniobrabilidad, especialmente en configuraciones con múltiples ranuras. Mientras que los moldes convencionales mostraban una disminución en el rendimiento conforme aumentaba la complejidad geométrica, el molde múltiple mantuvo una precisión mínima del 96 % y máxima del 98 %, incluso en configuraciones individuales, lo que confirma su robustez y estabilidad dimensional.

Desde el punto de vista económico, aunque el coste de fabricación del molde múltiple fue 25 % superior al de un molde convencional de una sola ranura, el coste global se redujo en un 88 %, al considerar la suma de los moldes unitarios necesarios para replicar todas las configuraciones incluidas en el arreglo múltiple. Esta diferencia representa una optimización significativa en términos de inversión, espacio y logística de producción.

Finalmente, la productividad del sistema fue validada mediante el número de piezas fabricadas por tipo de molde. Esto se advierte en la Figura 9, donde el molde múltiple permitió alcanzar el objetivo de conformado inicial con una relación de 22 piezas por un solo molde, en contraste con la necesidad de 22 moldes individuales en el sistema convencional, lo que consolida así su eficiencia y escalabilidad en procesos de manufactura avanzada.

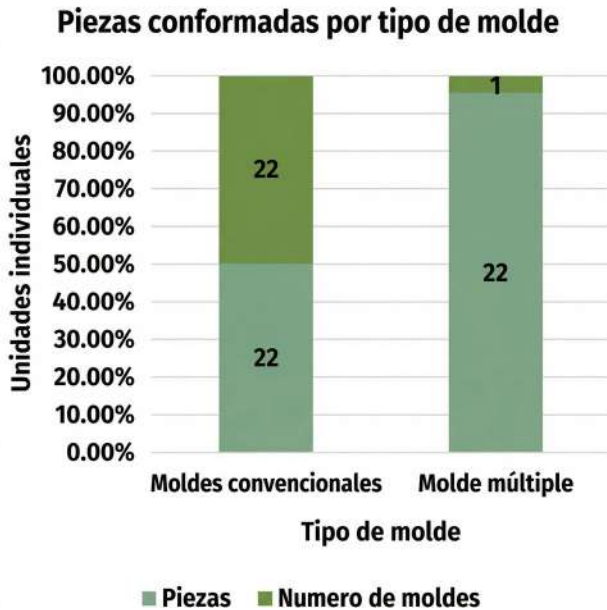


Figura 9. Producción máxima de piezas por tipo de molde.

CONCLUSIONES

La implementación del molde polivalente múltiple demostró ser una solución innovadora y de alta eficiencia en el contexto de la fundición por gravedad. Su diseño modular permitió validar su funcionalidad en una línea de producción real, maximizando la productividad dimensional y eliminando la necesidad de fabricar moldes unitarios específicos para cada tipo de pieza, lo que representa una mejora sustancial frente a los moldes convencionales utilizados de forma tradicional.

Un aspecto relevante obtenido como parte de los resultados es la apreciación de que el molde polivalente aportó una alta adaptabilidad geométrica y compatibilidad estructural, que se atribuye a su configuración algorítmica reutilizable, capaz de producir al menos 22 piezas diferentes con un solo sistema moldeable, todas bajo un mismo dimensionamiento estándar.

A diferencia de los moldes tradicionales, que requieren múltiples unidades para piezas distintas, el molde polivalente permite la fabricación de piezas múltiples con huellas múltiples, optimizando espacio, recursos y tiempo de operación.

Durante su implementación, se comprobó que el diseño y la fabricación del molde cumplían con los parámetros proyectados, alcanzando una eficiencia de ensamblaje del 97 %. La práctica operativa permitió reducir significativamente los tiempos de armado y desarmado, estabilizando la curva de aprendizaje derivada de la transición entre sistemas convencionales y modulares. Esta mejora operativa confirma la viabilidad del molde polivalente como mecanismo de conformación adaptable y funcional.

Los resultados alcanzados permiten constatar que a corto plazo, el sistema cumple con las exigencias de producción establecidas y, a mediano y largo plazo, se proyecta alcanzar desde 3000 hasta los 40,000 ciclos funcionales, manteniendo la calidad y repetibilidad del proceso. Además, aunque el coste de fabricación del molde fue 25 % superior al de un molde unitario sencillo, el coste global se redujo en un 88 %, al considerar la suma de los moldes convencionales que reemplaza, lo que valida su escalabilidad económica y técnica.

Para concluir, se comprobó que el estudio y rediseño de procesos de fabricación, apoyado en tecnologías como PAT, MTM y CAD, permite desarrollar moldes polivalentes adaptables a familias de productos. Dichos sistemas no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que representan una alternativa tecnológica viable para microempresas manufactureras, lo cual contribuye a la evolución de la manufactura nacional hacia modelos más rentables, flexibles y sostenibles.

Un aspecto que cabe adicionar como parte de las conclusiones del estudio es la finalidad de 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.

REFERENCIAS

- Akar, Necip & Turgay, Safiye. (2023). Optimizing Cellular Manufacturing Facility Layout Design through Digital Twin Simulation: A Case Study. *Industrial Engineering and Innovation Management*. 6. 1-12. 10.23977/ieim.2023.060601.
- Breznik, M., Buchmeister, B., & Vujica Herzog, N. (2023). Assembly line optimization using MTM time standard and simulation modeling: A case study. *Applied Sciences*, 13(10), 6265. <https://doi.org/10.3390/app13106265>
- Bush, D.M., Regner, E.V., Kolvin, E.L., Mueller, L.N., Rioja, R.J., & Bodily, B.H. (2019). *Methods for producing forged products and other worked products*. <https://patents.google.com/patent/WO2015006447A1/en>

- 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. http://nthe.mx/NTHE_v2/pdfArticulos/PDF_Articulo20210114174100.pdf
- Cano-Figueroa, M. A., & Pérez Bustamante, R. (2022). Diseño y configuración de molde progresivo para dispositivos mecánicos de tracción (Progressive mold design and configuration for mechanical traction devices). *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica (RIIIT)*, 10(56), 17-32. <https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/441>
- Djabraian, S., Teichmann, F., & Müller, S. (2024). Thermo Mechanical Optimization of Die Casting Molds Using Topology Optimization and Numerical Simulations. *Materials*, 17(9), 2114. <https://doi.org/10.3390/ma17092114>
- Dong, B., Wu, H., Wu, B., An, Z., Du, Y., Liu, X., & Zheng, W. (2025). Hybrid experimental design methodology for non destructive transfer of industrial scale frozen sand molds: An improved response surface approach with engineering validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15361-w>
- Flores Benítez, F.R., & Núñez Silva, G.B. (2022). Aplicación del Lean Manufacturing a una pequeña empresa de fundición metálica (Application of Lean Manufacturing to a small metal foundry). *E-IDEA 4.0 Revista Multidisciplinar*, 4(11), 18-30. <https://doi.org/10.53734/mj.vol4.id216>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Vilkas, M., Grybauskas, A. y Amran, A. (2022). Drivers and barriers of Industry 4.0 technology adoption among manufacturing SME's: a systematic review and transformation roadmap. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33 (6), 1029-1058. <https://doi.org/10.1108/jmtm-12-2021-0505>
- Groover, M. P. (2012). *Fundamentos de manufactura moderna* (3ª ed.). Pearson Educación. <https://archive.org/details/GrooverFundamentosDeManufacturaModerna3edi>
- Goncalves, E. V., & Chaves, A. S. (2000). Una metodología para la elaboración de proyectos de fabricación de piezas fundidas. *Información Tecnológica*, 11(1), 3-10. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642000000100001>
- Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring. *Sensors*, 23(4), 2204. <https://doi.org/10.3390/s23042204>
- Hitzler, L., Shahul Hameed, M.Z., Kah, A., Merkel, M., & Werner, E. (2022). Thermal expansion and temperature-dependent Young's modulus of Invar fabricated via laser powder-bed fusion. *Progress in Additive Manufacturing*, 7, 463-470. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00299-2>
- Iberian Press (2025, marzo 18). *El papel fundamental de los moldes en la producción industrial moderna* (The fundamental role of molds in modern industrial production). <https://www.iberianpress.es/noticia/el-papel-fundamental-de-los-moldes-en-la-produccion-industrial-moderna/62537>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S.R. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology* (7th ed.). Pearson Education. <https://www.pearson.com/se/Nordics-Higher-Education/subject-catalogue/engineering/ManufacturingEngineering-and-Technology-7th-SI-Edition.html>
- Medendorp, J., Román-Ospino, AD, y Panikar, S. (2022). Rol de la tecnología analítica de procesos en la fabricación continua. En *Cómo diseñar e implementar sistemas de fabricación continua de polvo a tableta* (pp. 201-228). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813479-5.00005-7>
- Mikkelsen, D. (2023). *HYBRID modeling validation and verification status matrix*. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). <https://doi.org/10.2172/2318699>
- Mir Labrada, V.M., García Hernández, T., Parada Expósito, A., Arzola Ruiz, J., Monzon Yepe, D., & Cuesta Figueroa, Y. (2023). Diseño y fabricación de un molde metálico para fundición de aluminio (Design and manufacture of a metal mold for aluminum casting). *Ingeniería Mecánica*, 26(1), 25-32. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442023000100025
- Pei, X., Hou, H., & Zhao, Y. (2025). A Review of Intelligent Design and Optimization of Metal Casting Processes. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 38(8), 1293-1311. <https://doi.org/10.1007/s40195-025-01891-5>
- Rao, H., Bai, X., Yan, W., & Liu, J. (2025). Rapid mold optimization based on ultraviolet curing 3D printing technology. *Frontiers in Materials*, 12, 1605771. <https://doi.org/10.3389/fmats.2025.1605771>
- Ruiz Sánchez, J.A., Arcos Gutiérrez, H., & Garduño, I.E. (2024). Optimización de parámetros en procesos de moldeo por inyección: Instrumentación para industria 4.0 (Optimization of parameters in injection molding processes: Instrumentation for Industry 4.0). *Revista Iberoamericana de Ciencias*. <https://www.reibci.org/publicados/2024/ago/5400115.pdf>
- Sánchez Carrión, E.F., Abarca Pérez, E.P., & Arguello, E.E. (2022). Optimización del proceso de fundición mediante ingeniería inversa y manufactura aditiva de un cabezote de motor (Optimization of the casting process through the reverse and additive engineering process of a small displacement engine head). *Conciencia Digital*, 5(3), 1-20. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i3.1.2249>
- Stampone, B., Deniz, K.I., Foscarini, A., Turco, A., Chiriaco, M.S., Ferrara, F., Giorleo, L., & Trotta, G. (2024). Rapid tooling for microinjection moulding of proof of concept microfluidic device: Resin insert capability and preliminary validation. *Applied Sciences*, 14(8), 3157. <https://doi.org/10.3390/app14083157>
- Villaseñor, J.L. (2016). Lista de verificación de las plantas vasculares nativas de México (Checklist of the native vascular plants of México). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 87(3). <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>