ARTÍCULO DE ANÁLISIS Y PROPUESTA METODOLÓGICA

Moldes sacrificables fotopolimerizados para la fabricación indirecta de cerámicas y metales

Diseño conjunto de la estabilidad durante la inyección y de la retirada acuosa con extracción parcial del binder

Juan Segurola, PhD

3Dresyns by Resyner Technologies S.L.
Donostia / San Sebastián, España
Correspondencia: info@3Dresyns.com

Versión 1 · ES · 7 de noviembre de 2026

Resumen

La fabricación indirecta mediante moldes impresos permite combinar la libertad geométrica de la fotopolimerización con los feedstocks utilizados en el moldeo por inyección de polvos cerámicos y metálicos. Su interés aumenta cuando el molde puede retirarse en agua y el binder del feedstock contiene una fracción también extraíble en ese medio. Ambas operaciones pueden compartir una etapa, aunque la desaparición del molde modifica simultáneamente el acceso del agua y el soporte mecánico de la pieza. Este artículo analiza esa interacción y propone un criterio de diseño que conecta la calidad del molde impreso, su estabilidad durante la inyección, la evolución de la pieza en el baño y la calidad después del sinterizado. Se distinguen la evidencia experimental publicada, la documentación técnica del fabricante y las deducciones del análisis. Se desarrolla una aproximación mecánica para explicar la sensibilidad de paredes internas esbeltas, un balance que separa la retirada del molde de la extracción del binder y un protocolo comparativo por etapas. La ventaja potencial de la ruta indirecta reside en poder seleccionar por separado el material que define la geometría y el sistema que cohesiona el polvo. Su utilidad debe demostrarse mediante geometría, integridad, tiempo y coste por pieza aceptada. El trabajo constituye un análisis y una propuesta metodológica; no presenta nuevos resultados experimentales ni establece superioridad general frente a la impresión directa.

Palabras clave: fabricación aditiva indirecta; fotopolimerización en cuba; molde sacrificable; CIM; MIM; binder parcialmente soluble; debinding acuoso; estabilidad dimensional; sinterizado.

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

1 Introducción

La fotopolimerización en cuba permite fabricar un molde a partir de un archivo digital sin mecanizar una cavidad metálica específica. El molde se utiliza después para conformar un feedstock, es decir, una mezcla de polvo y aglomerante o binder, que se transforma en una pieza cerámica o metálica mediante eliminación del aglomerante, denominada debinding, y sinterizado. La geometría se imprime en el molde y se transfiere al material inyectado. Esta separación permite ajustar el fotopolímero a las necesidades del utillaje y el binder a las necesidades del polvo. La pieza conformada que todavía contiene binder se denomina cuerpo en verde.

La oportunidad es especialmente clara en prototipos, series cortas y geometrías que quedan enclavadas dentro del molde. Un canal curvo, una cavidad con contrasalidas o un núcleo entrelazado con la pieza pueden impedir el desmoldeo mediante la apertura de dos mitades. Si el material del molde se elimina de forma controlada, desaparece esa restricción de apertura. Permanecen, sin embargo, las condiciones de llenado, ventilación, acceso del medio de retirada y conservación de la pieza [1,2].

El moldeo por inyección de cerámicas, CIM, y el moldeo por inyección de metales, MIM, pertenecen al moldeo por inyección de polvos, PIM, y comparten la necesidad de eliminar el binder conservando la distribución del polvo. En un sistema parcialmente soluble, la primera extracción crea poros mientras una fracción insoluble mantiene la cohesión. Esa estructura residual permite manipular la pieza y completar el tratamiento térmico. Acoplar esta extracción con la retirada del molde resulta atractivo porque puede reducir transferencias y aprovechar un mismo medio de proceso.

La cuestión científica es determinar cuándo ese acoplamiento conserva la geometría. Durante la inyección, el molde necesita rigidez y resistencia suficientes; durante la retirada, debe perder su continuidad sin transmitir esfuerzos inadmisibles a la pieza. Al mismo tiempo, el feedstock pierde parte del binder que le daba resistencia. La viabilidad depende de la evolución conjunta de ambos materiales, no únicamente de que cada uno sea soluble por separado.

ER-49 desarrolló la comparación de cadenas completas mediante coste por pieza aceptada y un registro de selección de rutas [3]. ER-85 distinguió clases de proceso, preparación del feedstock y evidencia por etapas; también señaló los límites de la HDT y la necesidad de comprobar acceso al agua, residuo y recuperación del cuerpo verde [4]. RP-02 proporciona el marco común de cualificación [5]. Sobre esos antecedentes, este artículo desarrolla la operación acuosa integrada: la pérdida simultánea de soporte y binder, la separación de sus contribuciones a la pérdida de masa y un procedimiento para establecer el punto final. El modelo de pared ilustra cómo la geometría del molde condiciona tanto la inyección como su retirada. La contribución es una síntesis específica con un protocolo contrastable, sin atribuir novedad a la clasificación de rutas, al coste por pieza aceptada ni al simple uso compartido de un baño.

2 Alcance y método de análisis

Se realizó una revisión dirigida de estudios primarios sobre moldes sacrificables para CIM y MIM, fabricación directa de cerámicas por fotopolimerización y eliminación acuosa de materiales impresos. Se consultaron además ISO 75-1 e ISO 75-2 y documentos técnicos públicos de los materiales utilizados como ejemplos. La revisión se cerró el 7 de noviembre de 2026. No se plantea como revisión sistemática exhaustiva ni como análisis de patentabilidad.

Se retuvieron fuentes que permitieran identificar el material, la operación efectivamente estudiada y el punto de la cadena alcanzado. Una demostración de llenado y desmoldeo se diferencia de una demostración que incluye debinding y sinterizado. Las fichas técnicas describen materiales y condiciones de referencia; no sustituyen una comparación experimental entre rutas. Las observaciones de

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

fabricación aportadas por el desarrollo de los sistemas 3Dresyns se utilizan para formular variables y criterios verificables, sin inferir composiciones propietarias.

Las deducciones mecánicas y los balances presentados son herramientas de interpretación. No se ajustan a una campaña de ensayos del conjunto 3Dresyn IM-HDT-WS y 3Dresyn EB1. El protocolo de la sección 8 define cómo someter las hipótesis a prueba y cómo evitar que un buen resultado en una etapa oculte un fallo posterior.

3 Evidencia disponible y selección de materiales

3.1 Lo que ya se ha demostrado

Wick-Joliat y colaboradores fabricaron moldes sacrificables de alcohol polivinílico (PVA) por extrusión de filamento y moldes de resina por proyección digital de luz (DLP) para conformar cerámicas de geometría compleja. La comparación favoreció al DLP en detalles finos y acabado. En ese estudio, la resina DLP se retiró en una disolución acuosa básica; por tanto, la expresión «retirada acuosa» no equivale necesariamente a disolución en agua neutra [1].

Zhang y colaboradores demostraron una cadena de fabricación de piezas metálicas con molde fotopolimerizado, feedstock específico e inyección a presión próxima a cero, seguida de retirada, debinding y sinterizado [2]. Basso y colaboradores estudiaron una hélice conformada con una suspensión de acero inoxidable y analizaron la deformación del utillaje mediante tomografía y simulación. Los autores tabulan una presión de inyección de 15 MPa y describen la retirada del molde en una disolución alcalina [6]. Este segundo trabajo aporta evidencia sobre llenado y geometría; no incluye debinding ni sinterizado.

También existen fotopolímeros retirables en medio acuoso ensayados como moldes para otros polímeros. Liz-Basteiro y colaboradores demostraron moldes sacrificables para policaprolactona y silicona [7]. Esos resultados respaldan la posibilidad de diseñar materiales con integridad temporal y retirada posterior, pero no establecen automáticamente su compatibilidad con un feedstock cerámico o metálico ni con su presión de inyección.

Tabla 1. Alcance de las demostraciones experimentales seleccionadas.

Sistema estudiado	Resultado publicado	Transferencia pendiente
CIM con PVA o DLP [1]	Geometrías complejas y piezas sinterizadas.	Otros polvos, moldes y condiciones de inyección.
PIM metálico a presión próxima a cero [2]	Cadena hasta el sinterizado y seguimiento de detalles.	MIM convencional a alta presión y otros binders.
Hélice de suspensión metálica [6]	Llenado, deformación y retirada en disolución alcalina.	Calidad de la pieza después del sinterizado.
Molde fotopolimerizado retirable en agua básica [7]	Moldeo de policaprolactona y silicona.	CIM y MIM con sus cargas térmicas y mecánicas.

Las condiciones de cada estudio forman parte de la evidencia. Una demostración de una etapa no acredita toda la cadena.

3.2 La impresión directa también admite mejoras en el binder

La impresión directa de suspensiones cerámicas o metálicas exige compatibilizar la carga de polvo, la respuesta óptica, la formación de capas y la resistencia del cuerpo en verde. Una red fotopolimerizada puede dificultar la eliminación de la fase orgánica, especialmente cuando los productos de descomposición deben recorrer trayectos largos. La cantidad de binder es relevante, pero su

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

distribución, su mecanismo de eliminación y la conectividad de los poros también determinan el resultado.

No existe un espesor máximo universal de 2 mm para la fabricación directa. Zhang y colaboradores obtuvieron piezas de alúmina de 15 mm sin grietas después del debinding [8]. Marie y colaboradores alcanzaron 11 mm de pared tras el debinding y 9 mm después del sinterizado en nitruro de silicio [9]. Son resultados de sistemas y ciclos concretos, no garantías transferibles a cualquier formulación.

Tampoco es correcto considerar que toda resina fotopolimerizable obliga a un debinding exclusivamente térmico. Leite de Camargo y colaboradores incorporaron una fase extraíble en agua para facilitar una eliminación en dos etapas en cerámicas impresas [10]. La comparación pertinente debe incluir tanto sistemas directos de eliminación principalmente térmica como sistemas directos con preextracción acuosa.

3.3 Materiales comerciales como ejemplos de implementación

La documentación de 3Dresyn EB1 describe un binder parcialmente soluble en agua para preparar feedstocks, con una fracción insoluble destinada a la eliminación térmica posterior. La ficha de 3Dresyn EB2G se orienta a polvos de elevada polaridad, como los de vidrio [11,12]. La presencia de esas dos fracciones es funcional: la extracción inicial reduce la carga orgánica mientras la fracción residual mantiene la cohesión. No debe buscarse la desaparición completa del binder en el baño si con ello se pierde la pieza.

Los sistemas 3Dresyn CDP-WS y 3Dresyn CDP-LDT WS representan, dentro de la misma oferta técnica, alternativas fotopolimerizables con una etapa acuosa de extracción [13,14]. Su inclusión evita atribuir a la inyección una ventaja que pudiera proceder del mecanismo de extracción del binder. 3Dresyn IM-HDT-WS es el material de molde sacrificable utilizado como ejemplo; su ficha lo orienta a procesos de inyección y colada a temperatura y presión elevadas [15]. Esa orientación comercial se distingue de la validación del conjunto concreto.

Estas designaciones identifican funciones de proceso. No se deducen porcentajes de componentes, mecanismos moleculares concretos ni equivalencias de desempeño entre productos. Las formulaciones para inyección y las formulaciones para impresión directa deben seleccionarse de acuerdo con el polvo y con las condiciones de cada ruta.

4 Obtención de un molde dimensionalmente estable

4.1 Nivel de resina y contacto con la impresión

En una impresora que expone desde el fondo de la cuba, una parte del objeto recién formado permanece en contacto con la resina líquida durante la construcción. En materiales solubles, ese contacto puede plastificar la superficie y aumentar su pegajosidad. Las instrucciones de uso de 3Dresyns recomiendan reducir el volumen de resina y mantener un nivel bajo mediante alimentación automática [16].

La condición útil es el nivel mínimo operativo que permita una reposición completa y estable entre capas. Reducirlo por debajo de ese valor puede dejar zonas sin alimentar o alterar la formación de la capa. Un alimentador automático debe compensar el consumo sin introducir oscilaciones importantes de nivel, burbujas o perturbaciones térmicas. La posición del punto de alimentación también forma parte del ajuste.

Para comparar impresiones, se propone registrar la altura del líquido, la orientación y el tiempo de contacto de las zonas críticas. En una aproximación de avance vertical uniforme, con nivel constante y sin considerar la salida temporal durante el despegado, una región permanece sumergida aproximadamente el tiempo necesario para construir una altura igual a la del líquido. Las diferencias entre regiones

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

aparecen si cambia el nivel o el tiempo por capa, si la impresión termina antes de que una región emerja o si la geometría retiene líquido. El movimiento de elevación y la película adherida también modifican el contacto. Debe registrarse esa historia para relacionarla con el tacto, las dimensiones y la resistencia local.

Un nivel bajo reduce la fracción de superficie sumergida en ciertas geometrías, pero no determina por sí solo el volumen de material plastificado. Este depende también de la penetración del líquido y del estado de curado. Para evaluar el efecto se deben comparar dimensiones después de la limpieza y del acondicionamiento, además de inspeccionar la superficie inmediatamente después de imprimir.

4.2 Calibración de exposición y fidelidad geométrica

Las Curing Rate Tables, CRT, relacionan el tiempo de exposición con el espesor curado para una formulación y unas condiciones ópticas determinadas [17]. Esta información ayuda a seleccionar una exposición que proporcione unión entre capas sin cerrar canales ni engrosar detalles. El exceso de exposición puede incrementar el curado fuera del volumen previsto, con consecuencias especialmente relevantes en Z y también en los contornos laterales.

La calibración debe describir la irradiancia en el plano de trabajo, la emisión espectral, la posición en el área de impresión, la temperatura y el espesor líquido utilizado en el ensayo. Si la cantidad de resina limita el espesor curado, el resultado queda truncado. Ese límite puede sesgar la estimación de la profundidad de penetración; el espesor del líquido no es, por sí mismo, una definición de dicha profundidad.

Se propone medir patrones con canales, paredes y cavidades representativos del molde, después de completar la limpieza y el poscurado. Una curva de curado aislada no reproduce toda la exposición acumulada en una construcción multicapa. Cuando la impresora solo permite ciertos incrementos de tiempo, deben registrarse los tiempos realmente programados y calcularse las dosis efectivas, evitando atribuir al ensayo dosis nominales que no se aplicaron.

El nivel de líquido durante la impresión y el espesor empleado para medir la CRT cumplen funciones diferentes. El primero debe permitir fabricar con una inmersión controlada; el segundo debe permitir medir el crecimiento del sólido sin limitarlo y describir las condiciones de intercambio con el aire. Transferir la calibración requiere comprobar el resultado en la configuración real del molde.

4.3 Limpieza y poscurado

En los sistemas solubles considerados, el agua y los alcoholes pueden dañar el molde recién impreso; por ello, la limpieza inicial debe diferenciarse de su retirada final [16]. Cleaning Fluid WS1 Bio está formulado para retirar resina superficial de piezas solubles o hinchables [18]. La limpieza debe verificarse en el interior de canales y cavidades, donde un residuo líquido puede curar después y modificar la geometría.

El protocolo del fabricante contempla poscurado por inmersión en Cleaning Fluid WS1 Bio fresco, separado del líquido de lavado cargado de residuos [16]. La evaluación propuesta debe registrar espectro, irradiancia, tiempo, temperatura y acceso de la luz. La ausencia de pegajosidad es un criterio superficial útil, pero no demuestra una conversión uniforme en toda la pared. La atenuación óptica y las zonas ocultas pueden producir estados de curado distintos.

El objetivo es obtener el estado de curado que satisfaga simultáneamente la estabilidad durante la inyección y la retirada posterior. Una mayor conversión puede mejorar la rigidez o la respuesta térmica y, en determinados sistemas, aumentar la fragilidad o dificultar la eliminación. La resistencia máxima al agua no constituye el objetivo de un molde sacrificable. Conviene ensayar el conjunto de propiedades después del mismo acondicionamiento que precederá a la inyección [15,16].

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

La humedad absorbida y el tiempo transcurrido entre poscurado e inyección se incorporan como variables de control. Para establecer la repetibilidad se propone fijar un acondicionamiento y comparar la masa y dimensiones del molde antes de su uso. No se prescribe un secado universal, porque temperatura y tiempo también pueden modificar el material.

5 Estabilidad durante la inyección

5.1 Interpretación de la HDT

La HDT es la temperatura a la que una probeta alcanza una deformación especificada bajo un ensayo de flexión definido. ISO 75-1 indica que ese resultado no representa necesariamente la temperatura máxima aplicable ni permite predecir directamente el comportamiento final en servicio [19]. En consecuencia, la temperatura del feedstock y la HDT del molde no deben compararse como si fueran dos límites equivalentes.

La ficha de 3Dresyn IM-HDT-WS expresa la HDT como «<160 °C» a 0,45 MPa [15]. Es una cota superior, sin valor central, cota inferior ni estado de curado de la probeta declarados. Por sí sola, no permite situar la temperatura del feedstock respecto a la HDT real del molde. Para caracterizar el material destinado al proceso, se propone medir la HDT según ISO 75-2, método B, en probetas con el mismo curado y acondicionamiento que el molde [20]. La tensión de 0,45 MPa corresponde al ensayo y no representa la presión de inyección. Un curado insuficiente puede reducir la HDT; cuantificar la relación entre conversión y HDT requiere medir ambas variables.

Puede ser viable inyectar un feedstock por encima de la HDT medida si la geometría, el apoyo, la presión y la duración del contacto permiten mantener la cavidad dentro de tolerancia. El calentamiento del molde es transitorio y puede diferir de la temperatura del material inyectado. Esta posibilidad se debe evaluar mediante la temperatura local y la deformación durante el ciclo, especialmente en paredes internas altas y delgadas. La ficha de 3Dresyn EB1 recomienda mezclar el feedstock a 160 °C [11]; esa temperatura de preparación no equivale necesariamente a la de inyección ni a la temperatura transitoria alcanzada por el molde.

5.2 Por qué las paredes esbeltas son críticas

Una aproximación sencilla ayuda a interpretar el efecto geométrico. Considérese una tira de pared rectangular, de altura libre h, espesor e y anchura b, empotrada en su base. Si recibe una diferencia de presión uniforme Δp entre sus caras, se puede representar como una viga en voladizo con carga distribuida. Bajo elasticidad lineal, pequeñas deformaciones y módulo E constante durante la carga, la flecha en el extremo es:

$$\delta = \frac{3\ \Delta p\, h^4}{2\ E\, e^3} \quad (1)$$

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

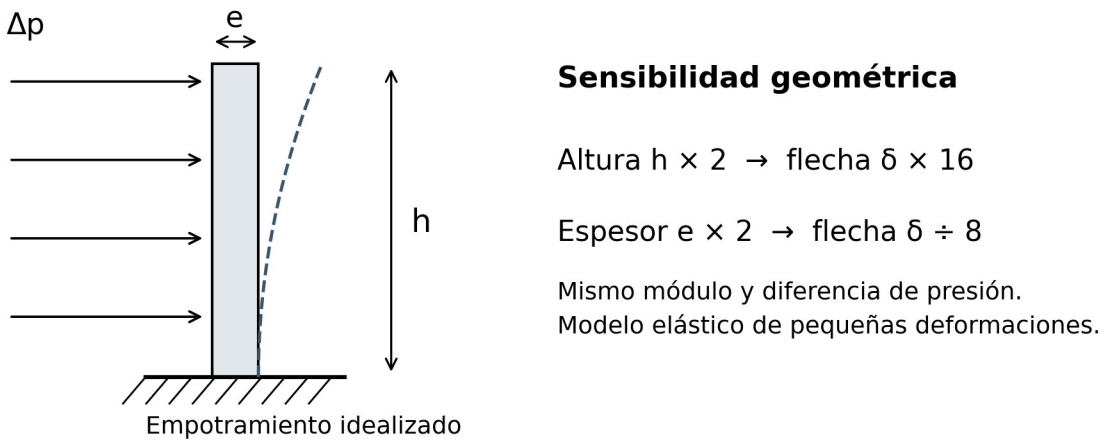

Figura 1. Idealización de una pared interna y sensibilidad de su flecha a la geometría. La anchura b es perpendicular al plano. El desplazamiento discontinuo es esquemático y no está a escala. Los factores indicados proceden de la ecuación 1; no son datos experimentales.

La expresión procede de la solución de viga con carga distribuida y del momento de inercia de una sección rectangular. Es una aproximación de sensibilidad, no una simulación validada del molde. Requiere una tira suficientemente esbelta para despreciar la deformación por cortante y una flecha pequeña frente a h. Una pared ancha o unida a otras por los bordes puede requerir un modelo de placa; la ecuación 1 no constituye una cota conservadora universal. El módulo pertinente corresponde al estado térmico, de curado y de acondicionamiento durante la inyección. Usar el módulo medido a temperatura ambiente puede subestimar la deformación.

Con las demás variables constantes, duplicar la altura libre multiplica la flecha por 16; duplicar el espesor la reduce a una octava parte. Estos factores son consecuencias del modelo, no resultados experimentales. Como ejemplo ilustrativo, con E = 2 GPa, Δp = 1 MPa y h/e = 10, la ecuación arroja δ/h = 0,75. Ese resultado excede el régimen de pequeñas flechas y exige otro análisis; no es una predicción válida para el producto. La relación explica por qué una pared corta y apoyada puede funcionar donde una lámina interna larga falla, aun utilizando la misma resina y temperatura.

Debe emplearse la diferencia de presión que flexiona la pared. La presión nominal de la máquina no actúa necesariamente como carga lateral completa sobre todos los elementos. Una pared situada entre dos cavidades puede experimentar diferencias transitorias durante el llenado. La geometría de entradas, la secuencia de flujo y los apoyos alteran esa carga. El modelo tampoco cubre fluencia, pandeo, fractura, grandes deformaciones o restricciones de placa; esos modos requieren ensayos o análisis más completos.

5.3 Diseño de soporte y acceso al agua

El engrosamiento de una pared puede mejorar su estabilidad durante la inyección y prolongar su retirada. Por eso conviene separar, cuando la geometría lo permita, la función de contener presión de la función de definir la superficie de la pieza. Un soporte exterior reutilizable puede sostener una envolvente sacrificable fina. Las nervaduras y los apoyos locales pueden reducir la longitud libre sin aumentar de forma uniforme la masa soluble.

El diseño debe conservar entradas y salidas para el medio acuoso una vez terminada la inyección. Una cavidad geométricamente imprimible puede resultar inviable si atrapa un núcleo sin acceso suficiente al agua o sin salida para los productos de retirada. Las soluciones de soporte se evaluarán junto con el acceso al baño y con las restricciones de llenado del feedstock.

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

6 Retirada del molde y extracción del binder en una operación acuosa

6.1 Dos transformaciones que pueden solaparse

Después de la inyección y del enfriamiento necesario para estabilizar el feedstock, el conjunto se introduce en el medio de retirada. El agua actúa sobre el molde y, allí donde alcanza la pieza, puede extraer la fracción soluble del binder. La extracción puede comenzar antes de que desaparezca todo el molde y continuar después. La integración se refiere a compartir una operación y coordinar sus fases; no exige que ambas transformaciones comiencen o terminen simultáneamente.

El estudio de Wick-Joliat y colaboradores ya describe retirada de PVA y predebinding simultáneos. Su procedimiento general incluye 4 a 6 días adicionales de extracción y al menos 24 h de secado [1]. Por tanto, retirar material del molde y del binder en un medio acuoso tiene antecedentes. La contribución aquí propuesta consiste en determinar los criterios de compatibilidad y el punto final de la operación para un conjunto concreto.

Durante el solapamiento cambia el área accesible del cuerpo en verde. Algunas regiones pueden empezar a perder binder mientras otras permanecen cubiertas. La extracción no tiene por qué ser uniforme. Cuando se libera una pared larga o un núcleo, la distribución de apoyos también cambia. El momento en que desaparece el molde puede ser mecánicamente más exigente que el inicio o el final del baño.

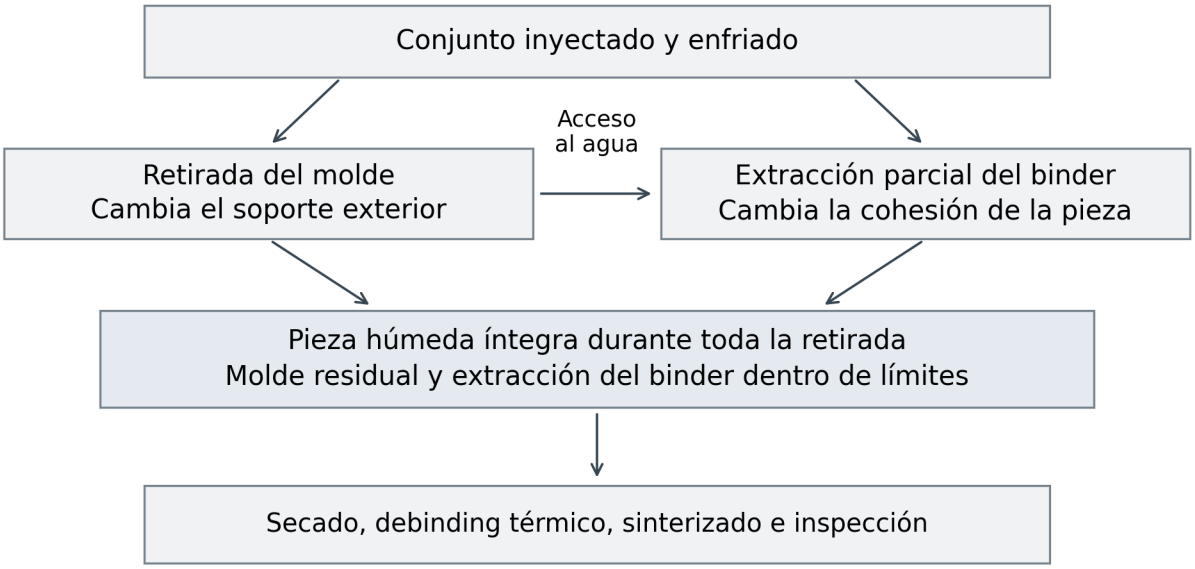

Figura 2. Acoplamiento entre retirada del molde y extracción parcial del binder. El avance de la retirada modifica el acceso del agua y el soporte. La integridad debe mantenerse durante toda la operación, además de cumplirse los criterios al final. Esquema conceptual propuesto.

6.2 Compatibilidad del conjunto durante la pérdida de soporte

Se propone estudiar el proceso como una transferencia progresiva del soporte desde el molde hacia la estructura residual del feedstock y, cuando proceda, hacia una cuna auxiliar. La pieza debe resistir su peso, la manipulación, el flujo del baño y los esfuerzos asociados al hinchamiento o a la retirada no uniforme. La fracción insoluble del binder contribuye a esa resistencia, pero no asegura por sí sola cualquier geometría.

El criterio de integridad debe cumplirse durante toda la operación. No basta con medir la resistencia antes del baño y después del secado, porque puede existir un estado intermedio más débil. Se propone interrumpir ensayos en distintos momentos y evaluar la pieza húmeda mediante cargas pequeñas y

geometrías representativas. La capacidad residual debe superar las solicitaciones previstas con un margen definido para la aplicación.

La química del polvo también debe ser compatible con el medio. En metales sensibles, las condiciones de agua, temperatura y exposición pueden modificar la superficie o favorecer oxidación; en otros sistemas pueden aparecer lixiviación o cambios del pH. La selección del medio se debe verificar con el polvo y el feedstock concretos. La experiencia con una cerámica no demuestra compatibilidad con todas las aleaciones.

6.3 Cómo separar la retirada del molde de la extracción del binder

La pérdida de masa del conjunto no identifica qué material se ha eliminado. Incluso en el caso ideal, sin pérdida de polvo ni agua retenida y utilizando estados de referencia secos comparables, el balance contiene dos contribuciones:

$$\Delta m_{total} = \Delta m_{molde} + \Delta m_{binder} \quad (2)$$

Una única pérdida de masa total admite distintas combinaciones de retirada del molde y extracción del binder. En una medición húmeda se añaden absorción de agua y líquido retenido; si se desprenden partículas, aparece además una pérdida de polvo. Por ello, la pesada global no demuestra por sí sola que se haya alcanzado la preextracción deseada.

Se proponen controles de molde aislado, feedstock aislado y conjunto moldeado bajo condiciones comparables. Los controles sirven para identificar comportamientos y establecer balances, pero sus velocidades no deben restarse automáticamente para predecir el conjunto: la accesibilidad y la composición del baño cambian cuando ambos materiales están presentes. La determinación del binder residual puede apoyarse en termogravimetría con una línea de base apropiada para el polvo y en métodos analíticos selectivos cuando sean necesarios.

El porcentaje extraído debe declarar su denominador. Eliminar una fracción del componente soluble no equivale a eliminar esa misma fracción del binder total ni de la masa total de la pieza. Asimismo, la masa seca y el contenido orgánico deben determinarse con un procedimiento que evite atribuir al debinding cambios debidos al secado, a la oxidación o al arrastre de partículas. Leite de Camargo y colaboradores retiraron en agua hasta el 44 % en volumen de la sacarosa añadida, con canales porosos concentrados cerca de las superficies [10]. Ese porcentaje se refiere al componente añadido, y la distribución observada ilustra por qué una extracción global no demuestra uniformidad local.

6.4 Punto final de la operación integrada

El punto final acuoso se establece experimentalmente cuando se cumplen conjuntamente la retirada del molde hasta un residuo admisible, la extracción objetivo del binder y la conservación de las dimensiones y de la integridad de la pieza. La resistencia húmeda debe ser suficiente durante toda la trayectoria precedente. Los límites se fijan antes de los ensayos y la inspección incluye las zonas de difícil acceso.

Se propone validar el proceso con grupos de réplicas independientes retiradas a tiempos de baño crecientes, con intervalos más próximos alrededor de la transición. Cuando la determinación del binder exige secado o análisis destructivo, cada réplica se destina a un único tiempo. Se registran primero las dimensiones y la integridad en húmedo; después se lleva la muestra a un estado seco de referencia definido para medir dimensiones, residuo de molde y binder residual mediante un método selectivo validado. Los cambios reversibles por agua se distinguen de la deformación permanente. El residuo interno se evalúa por tomografía si el contraste y la resolución permiten detectarlo, o por seccionado de réplicas y análisis complementario.

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

El resultado es el primer tiempo ensayado que satisface los criterios dentro de la resolución temporal y de la incertidumbre de medida, no el instante exacto de cumplimiento. Se comprueba también la integridad en los tiempos intermedios y en un intervalo posterior para delimitar una ventana operativa. Su transferencia a producción exige validar tiempo, temperatura, carga y renovación del baño para las geometrías y lotes incluidos. Las comprobaciones no destructivas por pieza se complementan con controles periódicos de residuo y extracción; una superficie limpia no acredita por sí sola el estado interno.

La temperatura, el volumen y la renovación del baño se ajustan al conjunto. A medida que el molde y el binder pasan al líquido, varía el medio que rodea la pieza. Mantener el mismo recipiente puede reducir manipulación, pero no obliga a conservar agua cada vez más cargada. Una operación integrada puede incluir renovación parcial, circulación, filtración o una fase final con medio limpio.

La ficha de 3Dresyn EB1 incluye como referencia un tratamiento acuoso a 65 °C durante 5 h [11]. Ese dato no fija el tiempo necesario para un molde de 3Dresyn IM-HDT-WS que encierra una geometría determinada ni demuestra que todas las regiones del feedstock alcancen la misma extracción. El tiempo útil debe establecerse mediante el punto final definido, seguido de un secado suficiente antes del tratamiento térmico.

7 Comparación de las rutas hasta la pieza sinterizada

La comparación debe conservar la función de la pieza, el material final y los criterios de aceptación. Las rutas pueden utilizar formulaciones y parámetros optimizados diferentes, pero las diferencias deben declararse. Conviene separar una comparación de capacidad geométrica, donde una ruta puede ser inviable, de una comparación de productividad sobre una geometría que ambas rutas puedan fabricar.

Tabla 2. Rutas que deben distinguirse en una comparación de fabricación.

Ruta	Formación y extracción	Cuestión principal
Indirecta con molde duradero	Inyección, apertura y extracción del binder.	Desmoldeo viable y vida del molde.
Indirecta con molde soluble	Inyección y retirada acuosa del conjunto.	Compatibilidad entre pérdida de soporte y extracción.
Directa con binder principalmente térmico	Fotopolimerización del cuerpo en verde y tratamiento térmico.	Salida de productos de descomposición sin daño.
Directa con preextracción acuosa	Fotopolimerización, extracción parcial y etapa térmica.	Porosidad accesible y cohesión residual.

Todas las rutas requieren definir el secado cuando corresponda, el sinterizado y la aceptación final. Es una clasificación de procesos, no una clasificación de calidad.

En la ruta indirecta, el polvo no necesita cumplir las mismas condiciones ópticas que en una suspensión fotopolimerizable. Esta separación puede facilitar el uso de cargas, granulometrías o composiciones difíciles de imprimir directamente. Continúan siendo necesarias la dispersión, la estabilidad del feedstock y una viscosidad compatible con el llenado. Una mayor carga de polvo no debe darse por supuesta por el solo hecho de emplear inyección.

Los porcentajes de carga deben compararse en volumen y con una definición coherente de las fases. Un porcentaje en masa de polvo metálico no es comparable directamente con el mismo porcentaje de polvo cerámico, debido a sus densidades. Para discutir el debinding deben cuantificarse la fase orgánica inicial, la fracción retirada antes del horno y la fase residual que entra al ciclo térmico.

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

Las fuerzas de separación en impresoras que exponen desde el fondo pueden imponer resistencia mínima al cuerpo en verde impreso directamente. La magnitud de esa exigencia depende de la arquitectura de desprendimiento, del área expuesta y de la formulación. No justifica asignar un porcentaje universal de resina a toda la fabricación directa. La ruta indirecta traslada parte de esas exigencias al molde y añade las propias del llenado y de su retirada.

Siguiendo el criterio ya utilizado en ER-49 [3], se adopta el coste por pieza aceptada como magnitud económica principal:

$$C_{aceptada} = \frac{C_{lote}}{N_{aceptadas}} \quad (3)$$

El coste del lote incluye materiales, preparación, utillaje, impresión, limpieza, poscurado, inyección, tratamiento acuoso, secado, horno, inspección y reprocesado, con la mano de obra, la energía y la amortización de equipos imputadas mediante criterios declarados. Se registran ocupación, tamaño de lote y servicios externos, evitando contabilizar dos veces una misma partida. El número de piezas aceptadas se obtiene después de aplicar los mismos requisitos finales. Si no se acepta ninguna pieza, la ruta no es viable para ese lote y el cociente no se utiliza como un coste finito.

El tiempo de entrega se mide desde el diseño liberado hasta la aceptación final. Se registran por separado el tiempo de operación, la ocupación de equipos y el tiempo transcurrido, porque algunas operaciones pueden realizarse en paralelo. Una etapa adicional de moldeo puede compensarse con una reducción de rechazos o de tiempo térmico, pero esa compensación debe medirse. La impresión más rápida no implica por sí sola la entrega más rápida.

8 Protocolo propuesto para la validación experimental

8.1 Hipótesis y comparaciones

La primera hipótesis es que existe un intervalo de curado y de geometría del molde que permite superar la inyección y conservar una retirada acuosa eficaz. La segunda es que la operación integrada puede reducir manipulación o duración respecto a una secuencia separada sin empeorar la integridad. La tercera es que una parte de la ventaja de debinding procede del binder extraíble y puede estar disponible tanto en una ruta directa como en una indirecta.

Para la segunda hipótesis se propone comparar conjuntos equivalentes con retirada y extracción separadas frente a una operación integrada. La secuencia de referencia debe definir cuánto binder se extrae inadvertidamente durante la retirada del molde; llamarla «separada» no elimina ese solapamiento físico. Para la tercera hipótesis se incluirán, cuando sean procesables, una ruta directa predominantemente térmica y otra directa con preextracción acuosa. La optimización de cada ruta debe documentarse y aplicar el mismo criterio de calidad final.

8.2 Geometrías y variables

La campaña debe comenzar con geometrías que separen mecanismos: paredes de distinta altura libre y espesor para deformación; cavidades accesibles y canales tortuosos para retirada; y cuerpos de distintos espesores para extracción del binder. Después se ensayará una geometría funcional que combine esas condiciones. Las dimensiones se seleccionarán según la aplicación y la capacidad metrológica, sin presentar un tamaño arbitrario como umbral universal.

Se mantendrán identificados el lote de polvo, su distribución de tamaños, la carga volumétrica, el lote y estado del binder y la versión del fotopolímero. Cuando no sea posible igualar alguna variable entre rutas, se describirá su efecto potencial. Las campañas cerámicas y metálicas se analizarán por separado.

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

En el molde se variarán de forma planificada el estado de curado, el nivel de resina y la geometría crítica. En la inyección se registrarán las historias de presión y temperatura pertinentes, el apoyo exterior y el llenado. En el baño se registrarán acceso, temperatura, volumen, composición y renovación. El orden de fabricación se alternará y las réplicas se repartirán entre construcciones independientes para distinguir repetición de lectura y repetición de fabricación.

Tabla 3. Mediciones propuestas para seguir el origen de los defectos.

Etapa	Mediciones principales	Criterio a establecer
Molde acondicionado	Dimensiones, superficie, humedad y estado de curado.	Cavidad dentro de tolerancia antes de inyectar.
Inyección y enfriamiento	Presión, temperatura, llenado y deformación.	Conservación de paredes y detalles críticos.
Tratamiento acuoso	Residuo de molde, binder e integridad; réplicas a tiempos crecientes, en estados húmedo y seco declarados.	Retirada y extracción suficientes sin daño intermedio.
Secado y debinding térmico	Masa estabilizada, carga orgánica y defectos.	Estado reproducible antes del sinterizado.
Pieza sinterizada	Dimensiones, densidad, defectos y propiedades funcionales.	Cumplimiento del mismo requisito final para cada ruta.

Los límites se fijan por aplicación. Los controles de molde y feedstock aislados complementan, pero no sustituyen, las mediciones del conjunto.

8.3 Metrología y aceptación

La geometría se comparará en puntos sucesivos: molde acondicionado, conjunto después de inyectar, pieza liberada y seca, pieza tras el debinding y pieza sinterizada. La tomografía resulta útil cuando las superficies internas no son accesibles; la metrología óptica o de contacto puede utilizarse en rasgos abiertos. La resolución y la incertidumbre del método deben ser adecuadas a la tolerancia que se pretende verificar.

Los criterios se fijarán antes de comparar rutas. Deben incluir desviaciones dimensionales, grietas, porosidad o densidad, residuos relevantes y propiedades funcionales de la aplicación. Las contracciones anisótropas se documentarán; una compensación CAD uniforme solo se aceptará si los resultados la justifican. La inspección superficial de una pieza sinterizada no sustituye la evaluación de defectos internos cuando estos sean críticos.

El informe presentará resultados individuales, dispersión entre construcciones y denominadores de aceptación en cada etapa. El número de réplicas se elegirá después de una campaña piloto según la variabilidad y la diferencia de interés industrial. Una reducción de tiempo solo se interpretará como mejora si se mantiene la calidad requerida. No se propone un porcentaje universal de ahorro ni un tamaño de muestra desligado de la aplicación.

9 Resultados del análisis y discusión

9.1 Una condición conjunta de fabricación y retirada

El análisis identifica una condición de viabilidad formada por requisitos que deben cumplirse conjuntamente. El molde debe conservar su geometría después de imprimir y acondicionar; la deformación durante la inyección debe quedar dentro del margen asignado; la pieza debe mantener

integridad durante la pérdida de soporte; y el tratamiento acuoso debe alcanzar sus objetivos de retirada y extracción. El proceso continúa con secado, debinding térmico y sinterizado hasta una aceptación final.

La aportación metodológica consiste en concretar la evidencia por etapas de ER-85 y el marco de cualificación de RP-02 [4,5] para una operación en la que el molde y el binder cambian simultáneamente. Se distingue la pérdida de masa de cada material, se vigila la integridad durante la pérdida de soporte y se fija el punto final mediante réplicas temporales en estados de medida definidos. Seleccionar el molde únicamente mediante HDT, la limpieza mediante tacto superficial o el baño mediante pérdida de masa total produce indicadores incompletos. Las mediciones intermedias permiten localizar el origen de una desviación y distinguir un fallo de impresión de uno de inyección, extracción o sinterizado.

El diseño admite compensaciones. Una pared más gruesa puede disminuir la deformación y aumentar el recorrido de retirada. Un mayor poscurado puede mejorar el comportamiento térmico y alterar la eliminación posterior. Un baño más intenso puede acelerar la retirada y aumentar las solicitaciones sobre la pieza húmeda. El resultado útil es una configuración que satisfaga todos los requisitos, no el máximo aislado de una propiedad.

9.2 Accesibilidad del utillaje y libertad geométrica

Existen impresoras con pantalla de cristal líquido (LCD) de precio inferior a 500 euros que ofrecen un paso de píxel pequeño. Como referencia comercial, la ficha de ELEGOO Mars 5 Ultra anuncia 18 µm en XY y precios por debajo de ese umbral en la fecha de consulta [21]. Ese dato describe la discretización de la imagen y el acceso al equipo; no garantiza una exactitud de 18 µm en el molde ni en la pieza sinterizada.

La reducción de inversión en la etapa de impresión puede facilitar iteraciones de diseño y fabricación distribuida de moldes. La cadena completa requiere equipos y control de inyección, tratamiento acuoso, horno e inspección. El principal valor en geometrías enclavadas puede ser hacer posible el desmoldeo, incluso cuando el coste por molde no sea el criterio decisivo.

Los moldes duraderos impresos son una alternativa cuando la apertura y la extracción mecánica son viables. Su vida se determina mediante ciclos de uso e inspección. Los sacrificables consumen un molde por operación, pero permiten geometrías diferentes. La selección entre ambas opciones debe incorporar el número de piezas y la complejidad de desmoldeo, sin asumir una duración fija del fotopolímero.

9.3 Interés aeroespacial y límites de transferencia

Los núcleos cerámicos que definen canales internos de refrigeración en álabes constituyen una aplicación relevante de fabricación indirecta. Wu y colaboradores combinaron estereolitografía y gelcasting para obtener núcleos cerámicos complejos [22]. El antecedente demuestra el interés de imprimir el negativo geométrico, aunque emplea una ruta de retirada térmica y no valida la operación acuosa propuesta aquí.

La extrapolación a componentes aeroespaciales requiere propiedades del material final, control de defectos y repetibilidad adecuados a la función. Fabricar un núcleo cerámico para fundición y fabricar directamente un álabe metálico por MIM son problemas distintos. La precisión del molde puede contribuir al resultado, pero no sustituye la validación del componente ni de su ruta industrial.

9.4 Límites de la evidencia y de la contribución

La bibliografía confirma la viabilidad de determinadas combinaciones de molde sacrificable y feedstock. No establece la validez de cualquier sistema de MIM a alta presión ni de cualquier binder comercial. La documentación de 3Dresyns permite identificar candidatos y procedimientos, pero no proporciona en este artículo una campaña comparativa completa del conjunto 3Dresyn IM-HDT-WS y 3Dresyn EB1 frente a todas las rutas consideradas.

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

La solubilidad del molde, los binders parcialmente extraíbles y el uso de un medio acuoso compartido tienen antecedentes. ER-49, ER-85 y RP-02 ya establecieron criterios de comparación y cualificación [3,4,5]. El presente trabajo los concreta para el acoplamiento entre pérdida de soporte y extracción, mediante un balance de masa, un punto final operacional y una explicación mecánica de la sensibilidad de paredes esbeltas. No establece prioridad absoluta sobre esos conceptos ni una mejora de productividad o de espesor fabricable: esas ventajas requieren datos bajo condiciones equivalentes de aceptación.

10 Conclusiones

Los moldes sacrificables fotopolimerizados permiten separar la generación de la geometría y la selección del binder que cohesiona el polvo. Esta separación es especialmente útil para componentes con contrasalidas o núcleos que impiden un desmoldeo convencional. Su interés debe evaluarse sobre la pieza final, incluyendo los efectos de extracción y sinterizado.

La fabricación de un molde soluble exige control del nivel de resina, calibración de exposición, limpieza compatible y poscurado reproducible. Un equipo económico puede formar parte de ese proceso, pero la resolución nominal de la impresora no expresa por sí sola la exactitud alcanzada. Las dimensiones deben verificarse después del acondicionamiento y en las etapas posteriores.

La HDT es un dato de caracterización, no una temperatura máxima universal de inyección. La estabilidad depende del estado del material, del calentamiento transitorio, de la diferencia de presión y del apoyo geométrico. La fuerte sensibilidad de las paredes esbeltas a su altura libre justifica diseñar conjuntamente la cavidad, sus apoyos y el acceso para la retirada.

La disolución del molde y la extracción parcial del binder pueden integrarse en una operación acuosa cuando el conjunto mantiene su integridad durante toda la pérdida de soporte. El punto final se determina con réplicas a tiempos definidos y estados húmedo y seco diferenciados, comprobando por separado el residuo del molde, el binder extraído y la geometría conservada. La pérdida de masa total no basta para identificar esos resultados.

La comparación con impresión directa debe incluir formulaciones con preextracción acuosa y expresar las cargas de polvo en bases comparables. El criterio propuesto es reducir tiempo o coste por pieza aceptada manteniendo los requisitos finales. El protocolo descrito permite comprobar esa ventaja y delimitar las geometrías y condiciones en las que la fabricación indirecta ofrece una mejora industrial verificable.

Declaraciones

Conflicto de intereses. El autor está vinculado a 3Dresyns by Resyner Technologies S.L., fabricante de materiales mencionados en el artículo. Los productos se utilizan como ejemplos de implementación y sus fichas se diferencian de la evidencia experimental independiente.

Disponibilidad de datos. Este trabajo no incorpora una nueva serie experimental. Las fuentes públicas se identifican en la bibliografía y las ecuaciones se definen en el texto. Las comparaciones y el protocolo propuestos no deben interpretarse como ensayos ya ejecutados.

Confidencialidad técnica. No se divulgan composiciones propietarias ni se infieren a partir de los nombres comerciales.

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES ·

Referencias

Los documentos web y las fichas técnicas se consultaron el 7 de noviembre de 2026. Los títulos y DOI conservan su idioma de publicación.

[1] Wick-Joliat, R.; Tschamper, M.; Kontic, R.; Penner, D. (2021). Water-soluble sacrificial 3D printed molds for fast prototyping in ceramic injection molding. Additive Manufacturing, 48, 102408. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102408

[2] Zhang, Y.; Basso, A.; Christensen, S. E.; Pedersen, D. B.; Staal, L.; Valler, P.; Hansen, H. N. (2020). Characterization of near-zero pressure powder injection moulding with sacrificial mould by using fingerprint geometries. CIRP Annals, 69(1), 185-188. DOI: 10.1016/j.cirp.2020.04.052

[3] Segurola, J. (2026). Direct and Indirect Additive Manufacturing for Advanced Ceramics and Metals: Evidence-Based Route Selection. Engineering Review ER-49, versión 1.1. 3Dresyns. DOI: 10.5281/zenodo.22048071

[4] Segurola, J. (2026). Vat-Photopolymerised Water-Soluble Sacrificial Tooling for Ceramic and Metal Powder Injection Moulding: Process-Class Boundaries, Intricate Geometry, Aqueous Removal and Qualification Requirements. Engineering Review ER-85, versión 0.5. 3Dresyns. DOI: 10.5281/zenodo.22123379

[5] Segurola, J. (2026). Evidence-to-Decision Qualification Framework for Vat Photopolymerisation. RP-02, versión 0.1. 3Dresyns. DOI: 10.5281/zenodo.22749012

[6] Basso, A.; Zhang, Y.; Kjeldahl Pløger, J.; Spangenberg, J.; Hansen, H. N. (2021). Analysing Powder Injection Moulding of a Helix Geometry Using Soft Tooling. Polymers, 13(23), 4183. DOI: 10.3390/polym13234183

[7] Liz-Basteiro, P.; Sanz-Horta, R.; Reviriego, F.; Martínez-Campos, E.; Reinecke, H.; Elvira, C.; Rodríguez-Hernández, J.; Gallardo, A. (2023). High resolution molds, sacrificial in aqueous media, obtained by vat photopolymerization 3D printing. Additive Manufacturing, 75, 103758. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103758

[8] Zhang, Y.; Li, T.; Duan, W.; Li, S.; Liu, B.; Wang, G. (2024). Degreasing process of thick-walled alumina ceramics based on vat photopolymerization. Ceramics International, 50(1), 847-856. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.10.169

[9] Marie, T.; Du, Z.; Gan, C. L.; Marinel, S.; Sridharan, V. S.; Manière, C. (2025). Debinding and sintering optimization of stereolithography based silicon nitride parts for attaining centimetric wall-thickness shapes. Journal of the European Ceramic Society, 45(2), 116911. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116911

[10] Leite de Camargo, I.; Oliveira da Costa, R.; Nascimento Ferreira, K.; da Silva, A.; Fortulan, C. A. (2026). Partially water-soluble feedstock for ceramic vat photopolymerization enabling two-stage debinding. Ceramics International, 52(14), 25634-25641. DOI: 10.1016/j.ceramint.2026.04.107

[11] 3Dresyns (2026). 3Dresyn EB1. Technical Datasheet, TDS-3DRESYN-EB1-EN, versión 1.3, agosto de 2026. Ficha técnica oficial

[12] 3Dresyns (2026). 3Dresyn EB2G. Technical Datasheet, TDS-3DRESYN-EB2G-EN, versión 1.3, agosto de 2026. Ficha técnica oficial

[13] 3Dresyns (2026). Ceramic 3Dresyn CDP-WS. Technical Datasheet, TDS-CDP-WS-EN, versión 1.3, agosto de 2026. Ficha técnica oficial

[14] 3Dresyns (2026). 3Dresyn CDP-LDT WS. Technical Datasheet, TDS-CDP-LDT-WS-EN, versión 1.3, agosto de 2026. Ficha técnica oficial

[15] 3Dresyns (2026). 3Dresyn IM-HDT-WS. Technical Datasheet, TDS-IM-HDT-WS-EN, versión 1.3, agosto de 2026. Ficha técnica oficial

[16] 3Dresyns. Instructions for Use (IFU) for Water-Soluble Sacrificial 3D Printed Resins. Documento técnico en línea. Instrucciones de uso

[17] 3Dresyns. Curing Rate Tables (CRT) - 3D Printing Calibration Data. Documentación del sistema de calibración. Documentación CRT

[18] 3Dresyns (2026). Cleaning Fluid WS1 Bio. Technical Datasheet, TDS-CLEANING-FLUID-WS1-BIO-EN, versión 1.3, agosto de 2026. Ficha técnica oficial

[19] International Organization for Standardization (2020). ISO 75-1:2020. Plastics - Determination of temperature of deflection under load - Part 1: General test method. Edición 4. Registro y alcance oficial de la norma

[20] International Organization for Standardization (2013). ISO 75-2:2013. Plastics - Determination of temperature of deflection under load - Part 2: Plastics and ebonite. Edición 3. Registro y alcance oficial de la norma

[21] ELEGOO. Mars 5 Ultra. Ficha y oferta comercial para la Unión Europea. Precio y especificaciones consultados el 7 de noviembre de 2026. Ficha oficial del equipo

[22] Wu, H.; Li, D.; Tang, Y.; Sun, B.; Xu, D. (2009). Rapid fabrication of alumina-based ceramic cores for gas turbine blades by stereolithography and gelcasting. Journal of Materials Processing Technology, 209(18-19), 5886-5891. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.07.002

© 2026 · Todos los derechos reservados · Versión 1 ES